

Franziska Sveja Isele

**Erfolgsfaktoren bei  
Verfahrensinnovationen im  
Lackbereich in Frankreich,  
Deutschland und in den USA**

**Eine empirische Studie am Beispiel eines US-  
amerikanischen Chemie-Konzerns und dessen  
Kooperationspartnern sowie lackchemische  
Untersuchungen und Entwicklungen**

**2005**

**Betriebswirtschaftslehre in den Naturwissenschaften**

# Erfolgsfaktoren bei Verfahrensinnovationen im Lackbereich in Frankreich, Deutschland und in den USA

Eine empirische Studie am Beispiel eines US-amerikanischen Chemie-Konzerns und dessen Kooperationspartnern sowie lackchemische Untersuchungen und Entwicklungen

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Naturwissenschaften im Fachbereich Chemie und Pharmazie

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster

vorgelegt von Franziska Sveja Isele

aus Mannheim

2005

Dekan: Prof. Dr. Bernhard Wunsch  
Erster Gutachter: Prof. Dr. Jens Leker  
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Hellmut Eckert  
Tag der mündlichen Prüfung: 24.10.2005  
Tag der Promotion: 24.10.2005

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von Dezember 2001 bis Juli 2005 unter der Anleitung von

**Prof. Dr. Jens Leker**

am Institut für betriebswirtschaftliches Management im Fachbereich Chemie und Pharmazie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster sowie in der DuPont Pulverlack GmbH & Co. KG.

Prof. Dr. Hellmut Eckert gilt mein Dank für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Für die fachliche und finanzielle Unterstützung bedanke ich mich bei der Firma DuPont Pulverlack Deutschland GmbH & Co. KG.

Desweiteren möchte ich meine Dankbarkeit folgenden Personen zum Ausdruck bringen:

Meinen derzeitigen Mitdoktoranden Frau Dipl.-Chem. Saskia Rühmer, Frau Dipl.-Volkswirtin Birgit Botterweck, Frau Dipl.-Chem. Andrea Sommerfeld, Herrn Dipl.-Chem. Michael Lessing und Herrn Dipl.-Biochemiker Stefan Picker.

Meinem ehemaligen Mitdoktoranden Dr. Carsten Vehring möchte ich für die geduldigen Hilfestellungen in der Anfangszeit meiner Arbeit danken.

Frau Anne Große Daldrup sei herzlichst gedankt für die unbürokratische Unterstützung zur Bewältigung bürokratischer Probleme.

Allen nicht namentlich aufgeführten und hilfsbereiten Kollegen im Institut für betriebswirtschaftliches Management im Fachbereich Chemie und Pharmazie danke ich für die angenehme Atmosphäre.

Ebenfalls möchte ich mich bei Dr. Uwe Wilkenhöner für seine Freundschaft sowie seine stets freundliche Unterstützung, insbesondere bei der Präparation der DMA-Proben, bedanken. Herrn Willi Schlesing sei gedankt für die Durchführung der DMA-Messungen.

Frau Dipl.-Chem. Saskia Rühmer, Frau Dipl.-Volkswirtin Birgit Botterweck sowie Herrn Dipl.-Chem. Michael Lessing danke ich für die gewissenhafte Durchsicht dieser Arbeit.

Ganz besonders danken möchte ich meinen Eltern Ulrike Isele-Wittenbeck und Horst Isele, die mir stets bei der Erreichung meiner Ziele geholfen haben.

Ebenfalls bin ich meinem Lebensgefährten Dr. Christian Hirsch zu besonderem Dank verpflichtet, der mich immer tatkräftig und mit viel Verständnis durch alle Höhen und Tiefen begleitet hat.

## **Tabellarischer Lebenslauf**

Franziska Sveja Isele;  
geboren am 7. Juli 1974 in Mannheim;

ledig

Eltern: Horst Isele  
Ulrike Isele-Wittenbeck, geb. Wittenbeck;

**Schulbildung:** Grundschule: von 1981 bis 1985 in Bensheim/Bergstrasse  
Gymnasium: von 1985 bis 1989 in Bensheim/Bergstrasse  
Gymnasium: von 1989 bis 1990 in Pullach bei München  
Gymnasium: von 1990 bis 1994 in Gräfelfing bei München

**Allgemeine Hochschulreife am 1.Juli 1994** in Gräfelfing bei München

**Studium:** Chemie  
Technische Universität München von 1994 bis 2000  
Wirtschaftswissenschaftlicher Zusatzstudiengang für Naturwissenschaftler und  
Ingenieure  
Fernuniversität Hagen seit 1999

**Promotionsstudiengang:** Chemie  
Universität Münster seit 2003

**Prüfungen:** Diplom im Fach Chemie am 13.November 2000

**Tätigkeiten:** Prozessingenieurin von April 2001 bis September 2001, Infineon Technologies  
AG, München  
Chemikerin seit Dezember 2001, DuPont Pulverlack Deutschland GmbH & Co.  
KG, Essenbach-Altheim

**Beginn der Dissertation:** Dezember, 2001, Institut für betriebswirtschaftliches Management  
im Fachbereich Chemie und Pharmazie

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Chemisch-technische Grundlagen</b>	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Grundlagen der Pulverlack-Technologie</b>	<b>10</b>
2.1.1	Duomere Pulverlacksysteme	10
2.1.2	Pulverlack-Herstellung	16
2.1.3	Pulverbeschichten	17
2.1.4	Vernetzung von Pulverlacken	19
<b>2.2</b>	<b>Bisherige Erkenntnisse zur Beschleunigung der Epoxy-Carboxy-Reaktion in Lacksystemen</b>	<b>21</b>
<b>2.3</b>	<b>Abgrenzung der Nahen-Infrarot- von der Infrarot- und der Umluft-Trocknung</b>	<b>24</b>
<b>2.4</b>	<b>Untersuchung von Pulverlacken</b>	<b>28</b>
	Bestimmung der Gelzeit	28
	Bestimmung der Glasübergangstemperatur	28
	Infrarot-Spektroskopische Untersuchungen	35
<b>3</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Beschleunigung der Epoxy-Carboxy-Reaktion in NIR- Pulverlacksystemen</b>	<b>39</b>
3.1.1	Gelzeitmessungen	39
3.1.2	Bestimmung der Reaktionsenthalpien	41
3.1.3	Mindestbestrahlzeiten mittels NIR	42
<b>3.2</b>	<b>Vergleich NIR-ausgehärtete NIR-Pulverlacke und konventionell ausgehärtete NIR-Pulverlacke</b>	<b>43</b>
3.2.1	Bestimmung der Glasübergangstemperatur	43
3.2.2	Vergleich der NIR-Pulverlacke mittels Infrarotspektroskopie	45
<b>4</b>	<b>Experimenteller Teil</b>	<b>54</b>
<b>4.1</b>	<b>Verwendete Substanzen</b>	<b>54</b>
<b>4.2</b>	<b>Verwendete Geräte</b>	<b>55</b>
<b>4.3</b>	<b>Synthese der beschleunigten NIR-aushärtbaren Pulverlacke</b>	<b>57</b>
<b>4.4</b>	<b>Herstellung der Proben für die vergleichenden Untersuchungen von unterschiedlichen Aushärtungsmethoden an unterschiedlichen NIR-härtbaren Pulverlacken</b>	<b>58</b>

4.4.1 Aushärtung mittels NIR-Strahlung	58
4.4.2 Herstellung der DSC-Proben	59
4.4.2 Herstellung der DMA-Proben	60
<b>4.5 Untersuchungsmethoden</b>	<b>62</b>
4.5.1 Gelzeitmessungen	62
4.5.2 DSC-Messungen	62
4.5.3 DMA-Messungen	65
4.5.4 Infrarot-spektroskopische Untersuchungen	66
<b>Teil 2: Erfolgsfaktoren einer Verfahrensinnovation</b>	<b>67</b>
<b>5 Erkenntnisse der bisherigen Neuproduktentwicklungs-Forschung</b>	<b>67</b>
5.1 Inhalte des Neuproduktentwicklungs-Prozesses	67
5.2 Organisation der Neuproduktentwicklung	72
5.3 Innovationskultur, -grad und -messung	75
5.4 Einfluss der Unternehmensleitung	79
5.5 Strategie der Neuproduktentwicklung	80
<b>6 Zum Status Quo der Erfolgs- und Umweltfaktoren von Verfahrensinnovationen auf dem Gebiet der Lackaushärtung</b>	<b>83</b>
6.1 Aufbau und Ausgestaltung des angewandten Forschungsdesigns und Durchführung der empirischen Untersuchung	83
6.2 Die Untersuchungseinheiten	87
6.3 Ergebnisse zum Status Quo der Umwelt- und Erfolgsfaktoren neuer Verfahren in der Lack-Industrie	89
6.3.1 Umweltfaktoren des US-amerikanischen, des deutschen und des französischen Lackmarktes	89
6.3.2 Wichtige Erfolgsfaktoren der Abstimmung der F&E-Aktivitäten mit externen Faktoren	96
6.3.3 Erfolgsfaktoren innerhalb des untersuchten Chemie-Konzerns	101
6.3.4 Prozesssteuerung (Entscheidungen zum Projekt-Abbruch, zur Projekt- Weiterführung oder zur Projekt-Änderung)	107
Innovationsgrad der untersuchten Lack-Innovationen	109
6.3.7 Patentrechtliche Absicherung der Technologien durch die US-amerikanische Firma DuPont	110

6.3.8 Erfolgsfaktoren und Umweltfaktoren einer Verfahrensinnovation auf dem Gebiet der Lackaushärtung	111
<b>7 Implikationen für Wissenschaft und Unternehmenspraxis</b>	<b>115</b>
7.1 Implikationen für die Wissenschaft	115
7.2 Implikationen für die Unternehmenspraxis	115
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>118</b>
8.1 Zusammenfassung	118
8.2 Ausblick	119
<b>9 Anhang</b>	<b>120</b>
9.1 Beschleunigung der Epoxy-Carboxy-Reaktion in NIR- Pulverlacksystemen	120
9.1.1 Gelzeitmessungen	120
9.1.2 Bestimmung der Reaktionsenthalpien	121
9.1.3 Mindestbestrahlzeiten mittels NIR	128
9.2 Vergleichende Untersuchungen von unterschiedlichen Aushärtungsmethoden an unterschiedlichen NIR-härtbaren Pulverlacken	141
9.2.1 DSC-Messungen	141
9.2.2 DMA- Messungen	147
9.3 Operationalisierung	150
9.4 Die Ausprägungen der Erfolgsfaktoren	157
<b>10 Abbildungsverzeichnis</b>	<b>166</b>
<b>11 Tabellenverzeichnis</b>	<b>170</b>
<b>12 Literaturverzeichnis</b>	<b>173</b>

## 1 Einleitung

In dieser Arbeit wird eine Verfahrensinnovation auf dem Gebiet der Lackaushärtung sowohl aus lackchemischer Sicht als auch aus der Perspektive des betrieblichen Innovationsmanagements betrachtet.

Es ist ein aktueller Trend hin zu der Entwicklung von Lacken mit sehr geringem VOC („Volatile Organic Compounds“)-Anteil zu beobachten<sup>[1]</sup>. Aus ökonomischen und besonders ökologischen Gründen wird die mögliche Anwendung von Pulverlacken immer wichtiger. Ein Grund stellt z.B. die organische Lösemittelverminderung nach der EU-Richtlinie (VOC-Richtlinie) dar. Der Ersatz organischer Lösemittel durch Wasser bietet eine Möglichkeit, in Lacken den VOC-Anteil zu reduzieren. Eine andere Möglichkeit ist die Verringerung des organischen Lösemittelgehalts. Pulverlacke sind vollständig lösungsmittelfrei und stellen aktuell den am stärksten wachsenden Markt unter den Beschichtungsstoffen dar. Welche und wie viele der derzeitigen Flüssiglack-Anwendungen durch Pulverlacke ersetzt werden können, ist stark abhängig von der Geschwindigkeit des Aushärtungs-Prozesses <sup>[2][3]</sup>. Eine Möglichkeit, die Aushärtungszeit zu verkürzen, stellt der Einsatz von Nah-Infrarot-(NIR)-Strahlung dar. Ein Vorteil bei Anwendung von NIR-Licht ist, dass die Wärmeübertragung hauptsächlich durch Strahlung und nicht durch Wärmeleitung wie bei herkömmlichen Infrarot-Licht erfolgt <sup>[4]</sup>.

Die nachfolgenden Untersuchungen einer Lackinnovation betrachtet deshalb die NIR-Anwendung im Pulverlack-Bereich.

Aus lackchemischer Sicht werden Nah-Infrarot-Strahlen im Pulverlackbereich industriell nur dann erfolgreich eingesetzt werden können, wenn zum einen die mittels NIR-Strahlen ausgehärteten Pulverlacke die gleichen lackchemischen Eigenschaften aufweisen wie konventionell ausgehärtete Pulverlacke und wenn zum anderen ausreichend beschleunigte Pulverlackssysteme zur Verfügung stehen, die die schnellen NIR-Aushärtungszeiten optimal umsetzen.

Daher soll im Rahmen dieser Arbeit eine lackchemische Bewertung von NIR-ausgehärteten Pulverlacken sowie eine Beurteilung von Beschleunigungssystemen für Hybrid-Pulverlacke vorgenommen werden.

Aus lackchemischer Perspektive resultieren damit die folgenden zwei Ziele:

- Feststellung, ob NIR-ausgehärtete Pulverlacke die gleichen lackchemischen Eigenschaften aufweisen wie konventionell ausgehärtete Pulverlacke
- Entwicklung eines für die NIR-Aushärtung geeigneten beschleunigten Hybrid-Pulverlacksystems

Wenn diese Ziele erreicht werden können, d.h. wenn lackchemisch die NIR-Technologie erfolgreich eingesetzt werden kann, erscheint es sinnvoll, die betriebswirtschaftlichen Fragestellungen für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Verfahrensinnovation zu untersuchen.

Bisher wurden, im Gegensatz zu Verfahrensinnovationen, eine Reihe von Produktinnovationen im Innovationsmanagement-Bereich untersucht (siehe 5).

Im Rahmen dieser Arbeit werden daher zwei Verfahrensinnovationen auf dem Gebiet der Lackaushärtung hinsichtlich Erfolgs- und Umweltfaktoren untersucht.

## **Teil 1: Lackchemische Untersuchungen und Entwicklungen**

### **2 Chemisch-technische Grundlagen**

#### **2.1 Grundlagen der Pulverlack-Technologie**

##### *2.1.1 Duromere Pulverlacksysteme*

Pulverlacke sind nach EN ISO 8130-14:2004 feine Harzteilchen, entweder thermoplastisch oder wärmehärtend, die im allgemeinen Pigmente, Füllstoffe und Additive enthalten, die beim Lagern unter geeigneten Bedingungen feinteilig bleiben und nach Applikation, durch Schmelzen und gegebenenfalls Härten eine Beschichtung ergeben [5].

Als Filmbildner werden thermoplastische und duromere Systeme verwendet [2]. Duromere<sup>1</sup> werden beim Erhitzen oberhalb einer kritischen Temperatur hart und erweichen beim erneuten Erhitzen nicht mehr. In diesem Zustand liegen die Duromere vernetzt vor. Ein Thermoplast hingegen erweicht beim Erwärmen oberhalb der Glasübergangstemperatur. In diesem Zustand ist ein Thermoplast verformbar und erhärtet beim Abkühlen in der neuen Form. Der Vorgang Erwärmen-Erweichen-Verformen kann beliebig oft wiederholt werden [6].

Da heute die duromeren Pulverlacksysteme bei weitem die wichtigsten Pulverlacksysteme darstellen, werden im Folgenden nur duromere Pulverlacksysteme näher betrachtet [2].

Verglichen mit den Thermoplasten, haben Duromere in der Regel bessere Formstabilitäts- und Verschleißcharakteristika [6], und ihre vernetzenden Ketten sind nur wenige Monomereinheiten lang.

Aufgrund der fehlenden Lösungsmittel besitzen Pulverlacke im geschmolzenen Zustand eine hohe Oberflächenspannung. Die hohe Oberflächenspannung kann auf ungenügend gereinigten oder vorbehandelten Metalloberflächen schlechte Benetzung, Kantenflucht und/oder schlechte Haftung bewirken. Um dies zu vermeiden, werden Pul-

---

<sup>1</sup> Häufig wird fälschlicherweise die Bezeichnung Duroplaste verwendet. Der Name Duroplaste ist nicht zutreffend, da sie nicht plastisch verarbeitet werden.

verlacke meist 1 bis 2 Massenprozent Verlaufsmittel, oft Polyacrylate, zugesetzt. Der Zusatz von Verlaufsmitteln vermindert gleichzeitig die Neigung zur Kraterbildung. Bei zu hoher Dosierung kann es zum Orangenhauteffekt kommen. Als Entgasungsmittel wird oft dem Pulverlack 0,1 bis 1 Gewichtsprozent Benzoin zugesetzt. Benzoin wirkt außerdem der Kraterbildung entgegen [2].

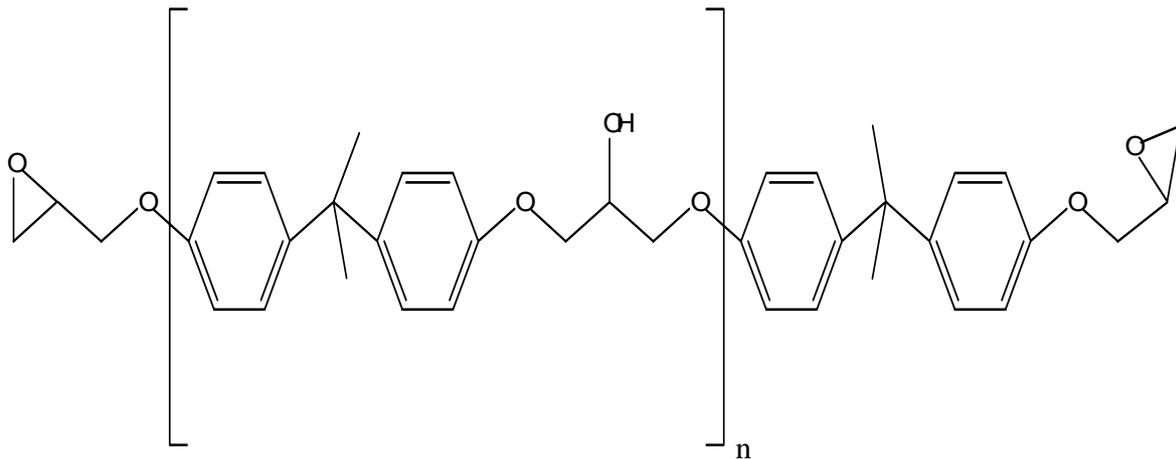
Die Tabelle 1 liefert einen Überblick der verschiedenen duromeren Pulverlacksysteme-Typen

System	Harz	Härter
Epoxidsystem	Epoxidharz	Phenolischer Härter Imidazol-Derivat Carbonsäureanhydride Modifiziertes Dicyandiamid
Hybridsystem	Carbonsäurefunktionales Polyesterharz	Epoxidharz
Polyestersystem	Carbonsäurefunktionales Polyesterharz	Triglycidylisocyanurat (TGIC) Aromatische Polycarbonsäure-Glycidylester Hydroxyalkylamidhärter
Polyurethansystem	Hydroxylfunktionelles Polyesterharz Hydroxylfunktionelles Acrylatharz	Isocyanataddukt, wie z.B. geblockte Derivate des Isophorondiisocyanats (Struktur s. Abbildung 8)
Acrylatsystem	Glycidylacrylatharz	Dodecandicarbonsäure

**Tabelle 1: Überblick über die duromeren Pulverlacksysteme [2]**

### 1) Epoxidsysteme:

Die Basis der am häufigsten eingesetzten Pulverlacksysteme bilden Epoxidharze vom Bisphenol-A-Typ (Struktur siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1: Struktur der Bisphenol A-Epoxyharze [7]**

Hauptsächlich werden Harze mit n-Werten von 3 bis 5 verwendet. Für hohe Schichtdicken werden n-Werte bis zu 8 vorgezogen. Niedermolekulare Harztypen bis hinunter zu  $n=2,5$  erlauben einen besseren Verlauf bei dünnen Lackfilmen. Als Härter für Epoxidsysteme kommen phenolische Härter, Imidazol-Derivate, Carbonsäureanhydrid-Härter und modifiziertes Dicyandiamid zum Einsatz (Reaktionsgleichungen siehe Abbildung 2). Die Modifizierung des Dicyandiamids bewirkt eine Verbesserung der Löslichkeit des Dicyandiamids im Epoxidharz [2].

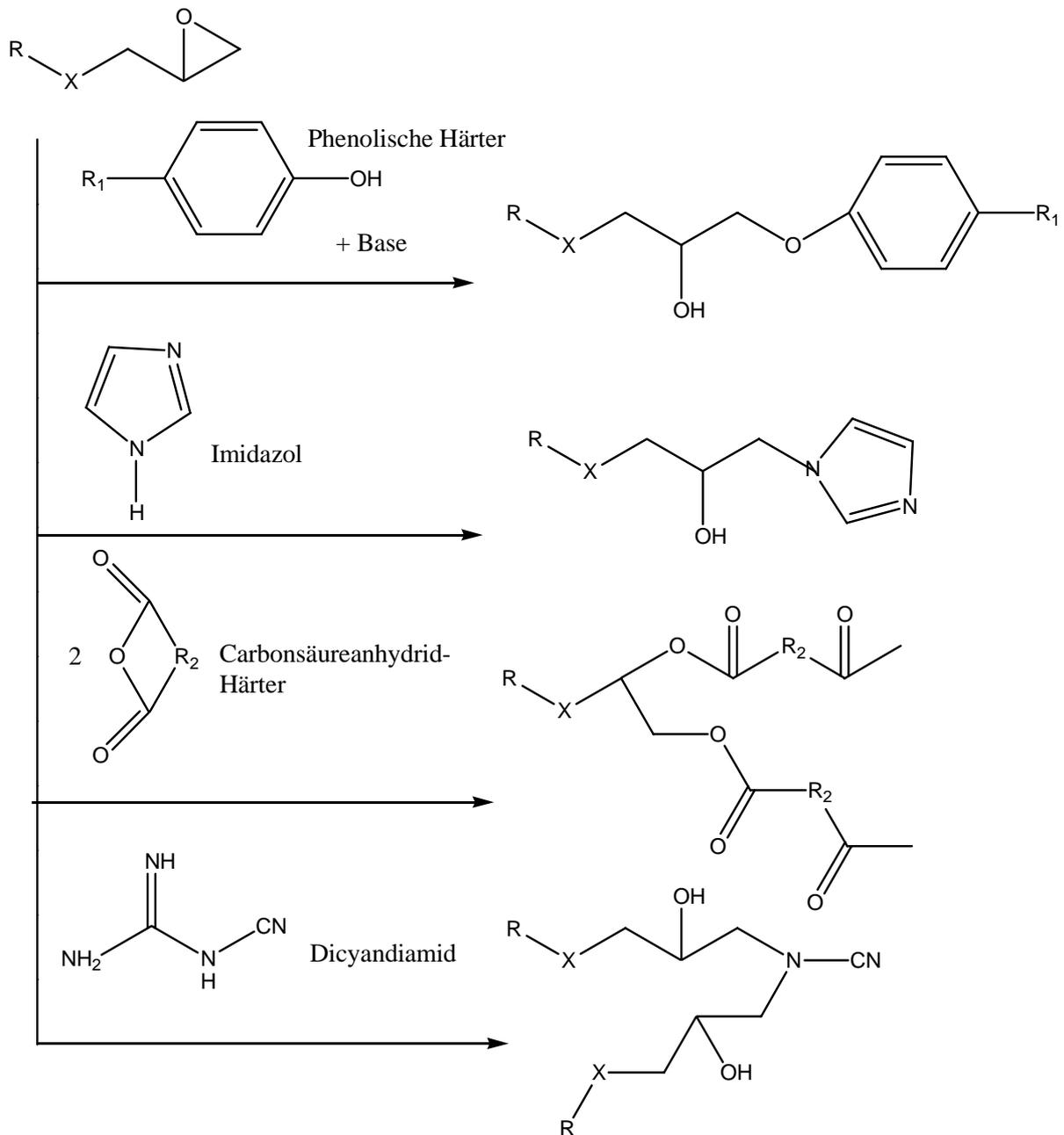


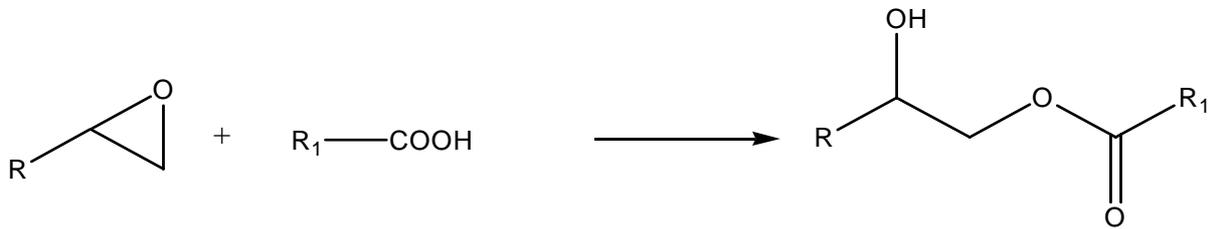
Abbildung 2: Mögliche Reaktionen Epoxidharz-Härter (in Anlehnung an Stoye/Freitag [7])

Phenolische Härter werden bei besonderen Anforderungen an den Korrosionsschutz verwendet und Carbonsäureanhydrid-Härter bei Pulverlack-Systemen, die besonders beständig gegen Vergilbung sind. Imidazolderivate finden nur in matten Beschichtungssystemen Anwendung [2].

## 2) Hybridsysteme:

Bei Hybridsystemen werden carbonsäurefunktionale Polyesterharze mit einer durchschnittlichen molaren Masse von einigen tausend g/mol mit Epoxidharzen umgesetzt

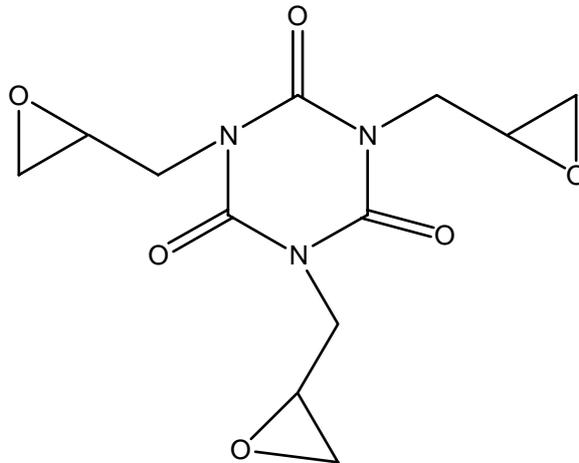
(siehe Abbildung 3). Hybridsysteme weisen nur eine geringfügige Wetterbeständigkeit auf, so dass sie überwiegend bei Innenanwendungen zum Einsatz kommen [2].



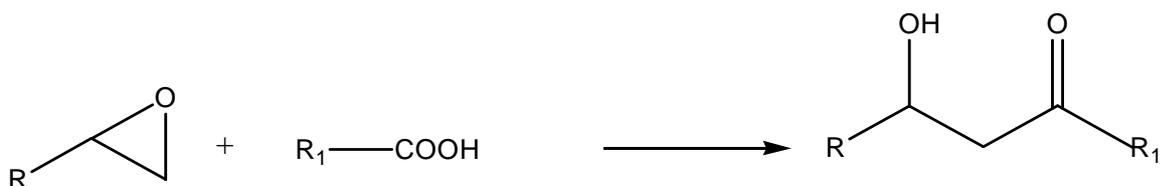
**Abbildung 3: Reaktionsgleichung der Umsetzung carbonsäurefunktionaler Polyesterharze mit Epoxidharzen (Hybridsysteme)**

### 3) Polyestersysteme:

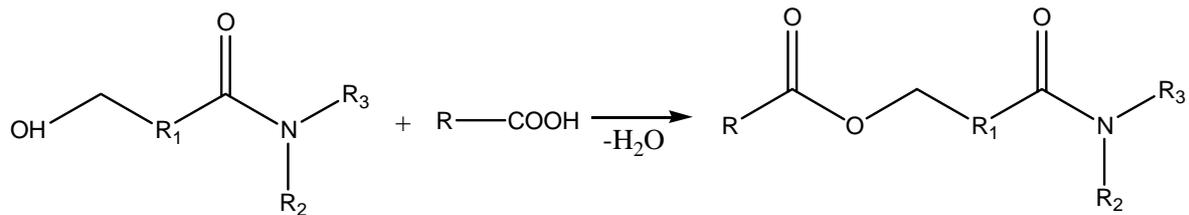
Bei Polyestersystemen reagieren carbonsäurefunktionale Polyesterharze mit Triglycidylisocyanurat (TGIC)–Härtern (Struktur TGIC siehe Abbildung 4), aromatischen Polycarbonsäure-Glycidylestern oder Hydroxyalkylamidhärtern [2]. Die jeweiligen Reaktionen sind in der Abbildung 5 bzw. Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 4: : Struktur des Triglycidylisocyanurats (TGIC) [8]**



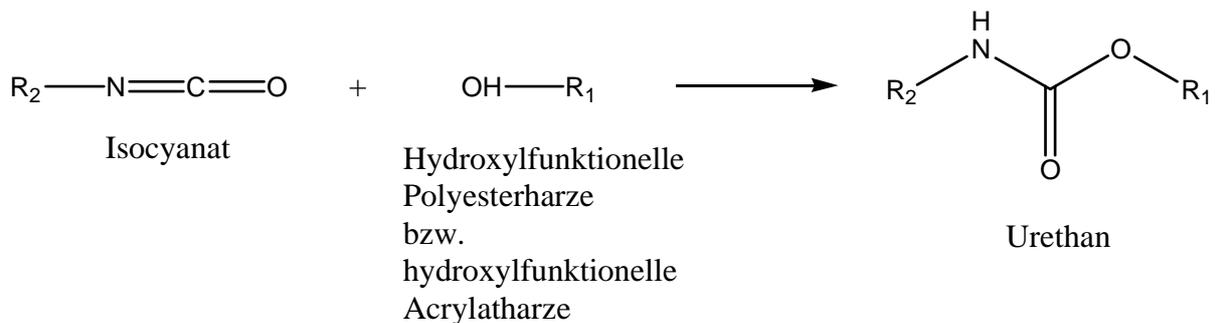
**Abbildung 5: Pulverlackhärtung durch Einwirkung von Triglycidylisocyanurat bzw. aromatischen Polycarbonsäure-Glycidylestern auf sauren Polyester**



**Abbildung 6: Pulverlackhärtung durch Einwirkung von Hydroxyalkylamidhärter auf sauren Polyester**

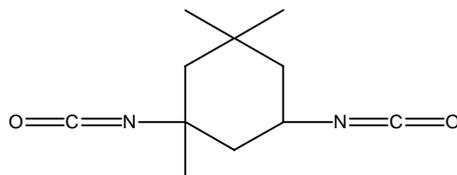
#### 4) Polyurethansysteme:

Bei Anwendung von Polyurethansystemen werden hydroxyfunktionelle Polyesterharze oder hydroxyfunktionelle Acrylatharze mit Isocyanaten, wie in Abbildung 7 ersichtlich, vernetzt.



**Abbildung 7: Vernetzung von hydroxyfunktionellen Polyesterharzen oder hydroxyfunktionellen Acrylatharzen mit Isocyanaten zu Polyurethan<sup>[9]</sup>**

Zum Einsatz kommen vor allem geblockte (verkappte) Derivate des Isophorondiisocyanats Struktur (zur Struktur des Isophorondiisocyanat siehe Abbildung 8). Geblockt bedeutet, dass an die Isocyanat-Gruppen H-acide Verbindungen wie Phenole, Alkohole etc. addiert sind.



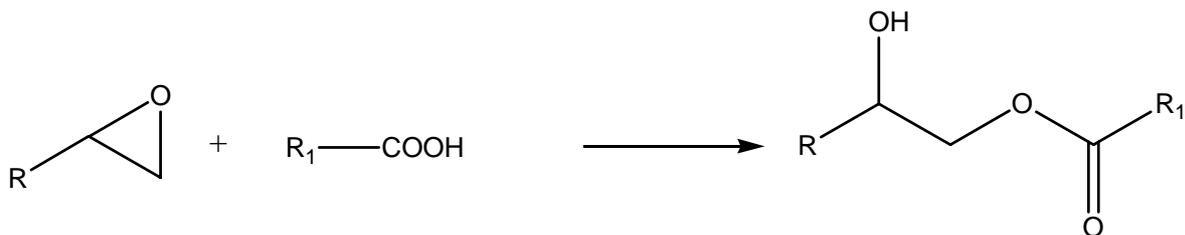
**Abbildung 8: Struktur des Isophorondiisocyanats <sup>[2]</sup> <sup>[10]</sup>**

Nachteilig hierbei ist, dass das Blockierungsreagenz beim Einbrennen abgespalten wird. Da die auf hydroxyfunktionellen Polyesterharzen basierenden Bindemittelsysteme ein besseres Fließverhalten zeigen als diejenigen auf carbonsäurefunktionaler Polyesterharz-Basis, weisen Polyurethan-Pulverlacke bessere Fließeigenschaften als die meisten anderen Pulverlacke auf [2] .

Um niedrigere Einbrenntemperaturen zu gewährleisten, können Polyurethansysteme durch Dibutylzinndilaurat oder tertiäre Amine katalysiert werden [2][11].

### 5) Acrylatsysteme:

Acrylat-Pulverlacke bestehen aus einem epoxyfunktionellen Acrylatharz, das mit Dodecandicarbonsäure umgesetzt wird (siehe Abbildung 9) [2] .



**Abbildung 9: Umsetzung von epoxyfunktionellem Acrylatharz mit Dodecandicarbonsäure**

#### *2.1.2 Pulverlack-Herstellung*

Die Bestandteile von Pulverlacken werden nach ihrem Einwiegen in einem Mischer vorgemischt, danach in einem Extruder homogenisiert und anschließend gemahlen. Die Dispergierung bei der Pulverlack-Herstellung erfolgt in Extrudern (Schneckenknetern). Extruder bestehen aus einer zylindrischen Röhre, in der eine sog. Schnecke rotiert. Diese Schnecke zieht die vorgemischte Harz-Additiv-Pigment-Mischung aus dem Einfülltrichter ein und befördert diese unter Schmelzen und Kneten (Scheren) durch die Röhre. Für die Herstellung von Pulverlacken verwendet man zwei verschiedene Extruder-Typen:

- 1) Einschnecken-Extruder mit einer periodisch hin und her bewegten Schnecke. Die Knetwirkung ergibt sich durch die komplexe Form und Bewegung der Schnecke in Verbindung mit den an der Innenwand der Röhre befestigten Knetzähnen.
- 2) Doppelschnecken-Extruder mit zwei gleichsinnig umlaufenden, kämmenden Schnecken. Die Schnecken enthalten zusätzlich zu den fördernden Segmenten auch Knetelemente.

Das Schmelzen der Harz-Additiv-Pigment-Mischung erfolgt ausschließlich durch die mechanische Scher- und Knetarbeit. Durch die großen Scherkräfte werden die Pigmentagglomerate schalenförmig von außen nach innen abgebaut. Die Scherkräfte vergrößern sich mit zunehmender Drehzahl der Schnecke (bis ca. 400 U/min). Damit vergrößert sich aber auch, wenn mit 100% Füllgrad gearbeitet wird, der Durchsatz (Massenstrom), und die mittlere Verweilzeit sinkt. Wenn technisch umsetzbar, besteht die Möglichkeit, durch Vergrößerung der Knetzone die mittlere Verweilzeit zu erhöhen.

Da die zu extrudierende Pulverlackmischung schon alle zur Vernetzung notwendigen Bestandteile enthält, ist sie hitzeempfindlich, d.h. als kritisch beim Extrudieren von Pulverlackschmelzen ist die Temperatur der Schmelze zu sehen. Eine zu große lokale Temperatur in der Knetzone kann eine partielle Gelierung (Vernetzung) bewirken. Daher muss die Höchsttemperatur der Schmelze mindestens 20 K unter der Einbrenntemperatur des Pulverlackes liegen. Des Weiteren soll die mittlere Verweilzeit nicht größer sein, als zur Dispergierung unbedingt notwendig ist, und die Verweilzeitverteilung soll möglichst eng sein.

Die Pulverlackschmelze verlässt den Extruder fast drucklos und wird in der anschließenden Kühlvorrichtung (z.B. Kühlwalze und Kühlband) abgekühlt [2].

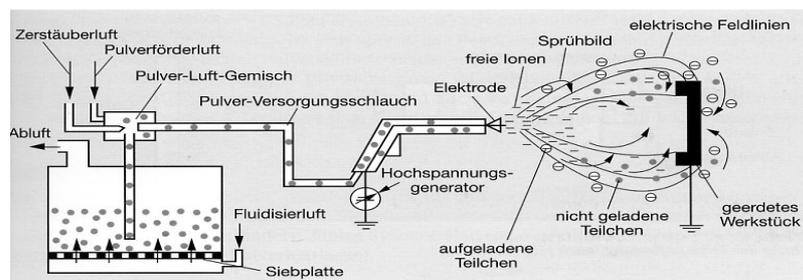
### *2.1.3 Pulverbeschichten*

Bei der Pulverlack-Applikation können zwei verschiedene Verfahren unterschieden werden:

- 1) das Pulversinterverfahren: die Werkstücke werden vor der Pulverlack-Applikation über die Schmelztemperatur des Pulvers hinaus erhitzt.

2) das elektrostatische Pulverbeschichten: die Pulverteilchen werden aufgeladen und im elektrischen Feld zum geerdeten Werkstück transportiert. An diesem erfolgt dann aufgrund der Coulombkräfte Anhaftung der Pulverteilchen. Zur Aufladung der Pulverteilchen werden zwei verschiedene Methoden verwendet, und zwar:

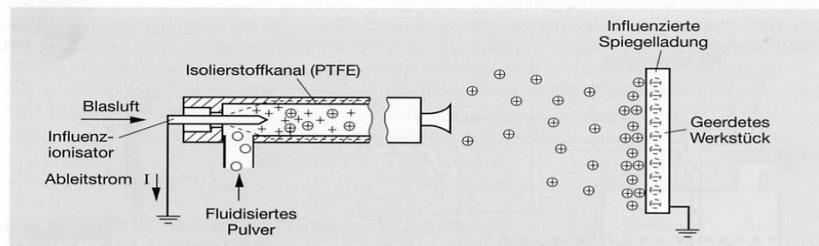
- a) das Korona-Verfahren: die Pulverteilchen werden, wie in Abbildung 10 dargestellt, durch Anlagerung freier Elektronen und  $O_2^-$ - und  $N_2^-$ -Ionen, die in einem angelegten Hochspannungsfeld mit einer oder mehreren Elektroden, im Inneren der Pistole oder beim Pulveraustritt, generiert werden, negativ aufgeladen. Bei Verwendung des Korona-Verfahrens ist bei zu geringem Abstand oder bei spitzen Kanten am Objekt die Gefahr einer zu hohen Aufladung des abgeschiedenen Pulvers durch den  $O_2^-$ - und  $N_2^-$ -Ionenstrom gegeben, dies kann zum Rücksprüheffekt und damit zu Oberflächenstörungen führen. Des Weiteren können  $O_2^-$ - und  $N_2^-$ -Ionenwolken die Abstoßung ankommender Pulverteilchen bewirken. Eine Abhilfe können sog. „ionenarme“ Korona-Systeme leisten. Bei diesen wird durch außen angebrachte, geerdete Gegenelektroden der  $O_2^-$ - und  $N_2^-$ -Ionenstrom teilweise zum Werkstück abgelenkt und auf diese Weise am Werkstück reduziert [2].



**Abbildung 10: Prinzip des Korona-Verfahrens [2]**

- b) das triboelektrische Verfahren, welches in Abbildung 11 gezeigt ist: die Pulverteilchen werden ausschließlich durch triboelektrische, d.h. reibungselektrische Effekte bei der turbulenten, schnellen Durchströmung eines Kunststoffkanals aufgeladen. Bei Verwendung von PTFE als Kunststoff-Material werden die Pulverteilchen ausschließlich positiv

aufgeladen. Auf der Innenseite des Kunststoffkanals baut sich eine hohe negative Ladung auf. Da diese in der Folge die weitere Reibungsaufladung behindern würde, muss sie über eine geerdete Gegenelektrode, dem sog. Influenzionsator, abgeleitet werden. Da beim triboelektrischen Verfahren ein äußeres angelegtes Hochspannungsfeld und geladene  $O_2$ - und  $N_2$ -Ionenwolken fehlen, ist die Beschichtung von Kanten und Hohlräumen (Faraday-Käfigen) leichter möglich [2] .

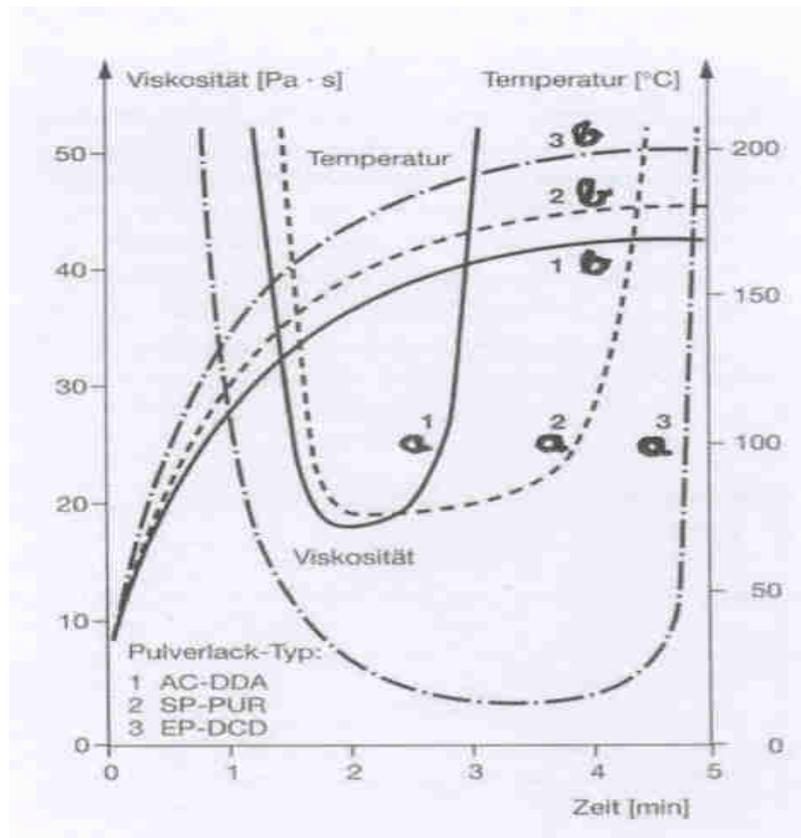


**Abbildung 11: Prinzip des triboelektrischen Verfahrens [2]**

#### 2.1.4 Vernetzung von Pulverlacken

Duromere Pulverlacke bestehen aus fein gemahlenden, isolierten Feststoffteilchen. Erst beim Erwärmen koaleszieren diese Teilchen zu einem geschlossenen Film unter gleichzeitiger Vernetzung. Die Viskosität der Pulverlackschmelze sollte derart eingestellt sein, dass der nachher entstehende Pulverlack sowohl ein gutes Aussehen als auch eine gleichmäßige Schichtdicke aufweist.

Der Viskositätsverlauf einiger verschiedener Pulverlacksysteme in Abhängigkeit von der Einbrennzeit ist aus Abbildung 12 ersichtlich:



AC-DDA= Filmbildnersystem aus epoxy-funktionalisiertem Acrylatharz und Dodecandicarbonsäure

SP-PUR= Filmbildnersystem aus OH-funktionalisiertem Polyesterharz und Isocyanataddukten

EP-DCD= Filmbildnersystem aus Epoxidharz und modifiziertem Dicyandiamid

a = Viskositätsverlauf

b = Temperaturverlauf

**Abbildung 12: Der Viskositätsverlauf von einigen verschiedenen Pulverlackssystemen in Abhängigkeit von der Einbrennzeit [2]**

Zu Beginn fällt die Viskosität nach dem Schmelzen mit zunehmender Temperatur ab. Mit größer werdender Temperatur nimmt die Geschwindigkeit der Vernetzungsreaktion zu.

Die Geschwindigkeit der Vernetzungsreaktion ist ab einer bestimmten Temperatur so schnell, dass der Viskositätsabfall bei zunehmender Temperatur durch das Beeinflussen der ansteigenden Filmbildner-Molmasse kompensiert wird. Die Viskosität erreicht, wie aus Abbildung 12 hervorgeht, abhängig vom Pulverlacksystem bei ca. 5-20 Pa\*s ein Minimum und nimmt anschließend mit weiter wachsender Vernetzung wieder zu. Vernetzungsreaktion und somit die Viskositätssteigerung halten solange an, bis entwe-

der der Filmbildner komplett abreagiert ist oder eine Einbrenntemperatur von ca. 50°C oberhalb der Glasübergangstemperatur erreicht wurde. Maßgeblichen Einfluss auf Koaleszenz und Verlauf hat die Oberflächenspannung. Da im Vergleich zur sehr großen Oberfläche des Pulvers die Oberfläche des Lackes nach der Koaleszenz sehr gering ist, hat eine hohe Oberflächenspannung eine unterstützende Wirkung auf die Koaleszenz [2].

## 2.2 Bisherige Erkenntnisse zur Beschleunigung der Epoxy-Carboxy-Reaktion in Lacksystemen

In der unkatalysierten Reaktion von Epoxy-Gruppen mit Carboxyl-Gruppen sind vier Reaktions-Produkte denkbar. In der Ringöffnungs-Reaktion der Epoxy-Gruppe mit einer Carboxyl-Gruppe werden zwei verschiedene Reaktionsprodukte gebildet. Ein Produkt ist der Ester des primären Alkohols und das zweite der Ester des sekundären [12].

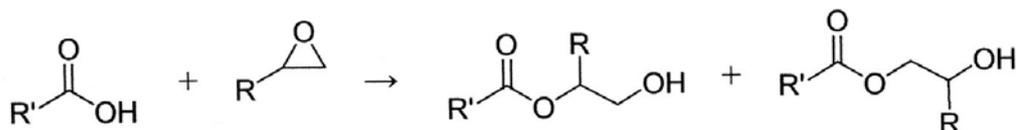


Abbildung 13: Ringöffnung der Epoxy-Gruppe mit einer Carboxyl-Gruppe Alkohols [12]

Die entstandene Esterverbindung kann einerseits mit einer Carboxyl-Gruppe, wie in Abbildung 14 dargestellt:

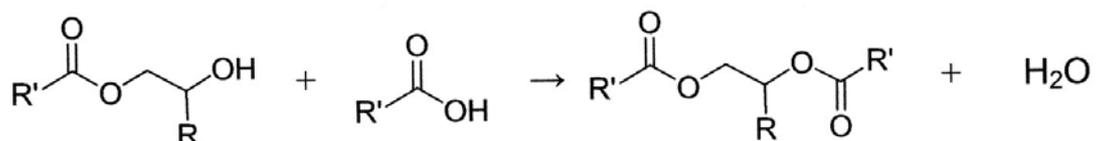


Abbildung 14: Reaktion der entstandenen Esterverbindung mit einer Carboxyl-Gruppe [12]

oder mit einer Epoxy-Gruppe weiterreagieren (s. Abbildung 15):

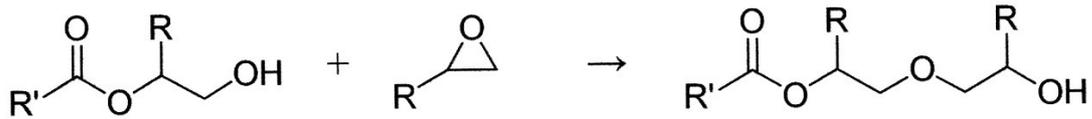


Abbildung 15: Reaktion der entstandenen Esterverbindung mit einer Epoxy-Gruppe <sup>[12]</sup>

Diese Reaktion ist nur bei einem Überschuss an Epoxy-Gruppen von Bedeutung. Das bei der 2. Reaktion gebildete Wasser kann zur Hydrolyse der Epoxy-Gruppe führen, wie in Abbildung 16 ersichtlich:

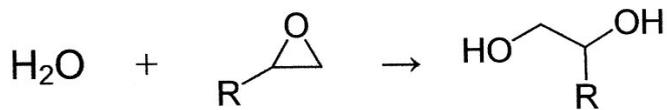


Abbildung 16: Hydrolyse der Epoxy-Gruppe <sup>[12]</sup>

In einem offenen System ist diese Reaktion nur von geringer Bedeutung.

Die Epoxy-Carboxyl-Reaktion ist in Pulverlacken eine weitverbreitete Reaktion <sup>[13]</sup>. Als Katalysatoren für die Epoxy-Carboxyl-Reaktion im Lackbereich sind die folgenden zu nennen:

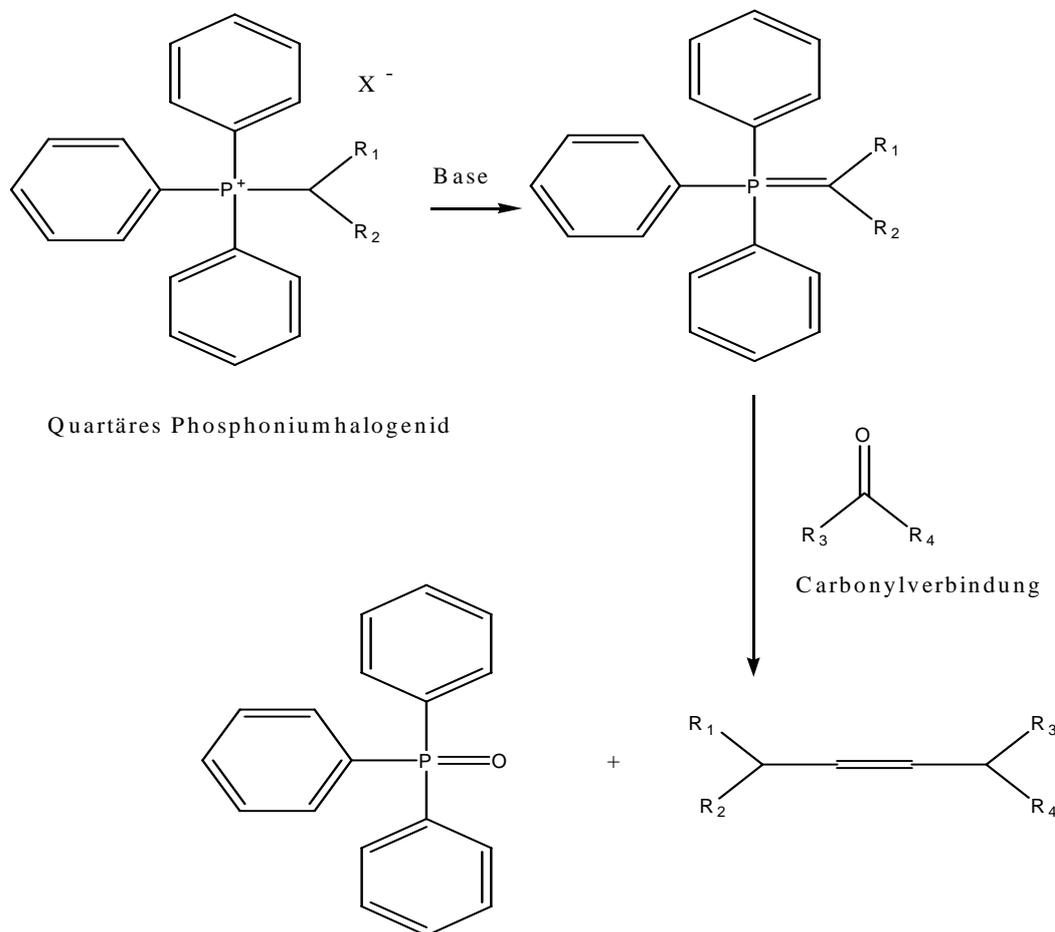
- 1) Aminische Verbindungen <sup>[14]</sup>, insbesondere quaternäre Ammonium-Verbindungen.
- 2) Phosphonium-Verbindungen, insbesondere quartäre Phosphoniumhalogenide.
- 3) Lewis-Säuren (wie z.B. Metallhalogenide (BF<sub>3</sub>, AlCl<sub>3</sub>, TiCl<sub>3</sub> etc.)), Super-Säuren (wie z.B. Katalysatoren auf Basis eines quaternären Ammonium-Hexafluoroantimonat Salzes) <sup>[14]</sup>.
- 4) Metall-Katalysatoren, wie z.B. Zn (II) Salze von Mono- oder Di-Ester der Phosphorsäure <sup>[15]</sup>.

Die Anwendung der Katalysatoren ist gemäß Subrayan et al. abhängig vom Epoxy-Typ. Zum Beispiel können Imidazole zur Katalyse bei aromatischen Epoxiden eingesetzt werden, sie sind demgegenüber aber relativ ineffizient bei der Katalyse von cycloaliphatischen Epoxiden <sup>[14]</sup>.

Da im experimentellen Teil dieser Arbeit ausschließlich Phosphoniumhalogenide als Beschleuniger untersucht werden, liegt der Fokus des theoretischen Teils zur Beschleunigung der Epoxy-Carboxy-Reaktion auf diesen Substanzen.

J.D.Smith beschreibt quartäre Phosphonium-Verbindungen als latente Beschleuniger für die Epoxy-Anhydrid-Reaktion. Der Startmechanismus erfordert wahrscheinlich die Bildung von Wasserstoff-gebundenen Phosphonium-Epoxy- oder Phosphonium-Anhydrid-Komplexen. Der Transfer eines Protons eines Phosphonium-Komplexes zu anderen Epoxy- oder Anhydrid-Molekülen scheint der geschwindigkeitsbestimmende Schritt in diesem Start-Mechanismus zu sein<sup>[16]</sup>.

Quartäre Phosphoniumhalogenide können als Nebenreaktion die Wittig-Reaktion eingehen. Dabei reagieren die quartäre Phosphonium Halogenide mit starken Basen zu den entsprechenden Alkyliden-Phosphoranen, die wiederum mit Carbonyl-Gruppen zu Alkenen reagieren (s. Abbildung 17) <sup>[17]</sup>.



**Abbildung 17: Reaktion von quartären Phosphonium-Verbindungen zu Alkenen (Wittig-Reaktion) [18]**

## 2.3 Abgrenzung der Nahen-Infrarot- von der Infrarot- und der Umluft-Trocknung

Bei den industriellen Anwendungen von Infrarotstrahlung bei Flüssigsystemen kann entsprechend des Hauptzwecks der verwendeten Strahlung eine Klassifikation in zwei Hauptgruppen erfolgen:

- 1) Trocknungsprozesse: bei diesen wird die Leistung zum Verdampfen von Flüssigkeiten verwendet
- 2) Erwärmungsprozesse (Einbrennprozesse): bei diesen ist das Verdampfen von Flüssigkeiten nebensächlich. Die Temperaturerhöhung bewirkt hauptsächlich, dass die Polymerisation der Bindemittel beschleunigt wird [29] .

Da bei Pulverlacken keine Verdampfung des Lösungsmittels erfolgen muss, dient die verwendete Strahlung hauptsächlich zur Polymerisation der Bindemittel.

Die Verwendung der NIR-Technologie zur Aushärtung von Pulverlacksystemen<sup>[19] [20] [21][22][23][24][25][26][27][28]</sup> gehört, wie die Infrarot-Trocknung von Flüssiglacken, zu den Trocknungsverfahren mittels Strahlen. Die erste bewusste Anwendung von Infrarotstrahlung zur Lackaushärtung waren Lichttunnels in den amerikanischen Ford-Werken in den 30iger Jahren des 20. Jahrhunderts <sup>[29][30][31]</sup>.

Das Wirkprinzip der NIR-Trocknungstechnologie beruht darauf, dass die Strahlen sofort bis an die Grenzschicht des Substrats gelangen und dort reflektiert werden. Es resultiert damit eine schnelle Volumenerwärmung der Schicht und nicht, wie bei der konventionellen Trocknung, eine langsamere Erwärmung durch Wärmeleitung <sup>[32]</sup>.

Die Umluft- (Konvektions)Trocknung ist gekennzeichnet durch die Trocknung mittels einem zirkulierenden Heißluftstroms.

Als Vorteile der Umluft-(Konvektions)Trocknung sind die folgenden zu nennen:

- 1) Das Verfahren ist wegen der guten Wärmeübertragung für alle Werkstückgeometrien anwendbar<sup>[2]</sup> .

- 2) Aufgrund der im Vergleich zum Trocknen mittels Strahlen langsameren Aufheizung resultieren breitere Einbrennfenster.

Demgegenüber sind die Nachteile:

- 1) Lange Trockenzeiten und damit großer Platzbedarf für den Ofen [2].

Die Infrarotstrahlung befindet sich im elektromagnetischen Spektrum im Wellenlängenbereich von 0,78  $\mu\text{m}$  bis 200  $\mu\text{m}$ . Technisch wird der Bereich von 0,8  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$  genutzt. Er wird in NIR-Strahlung, kurzwellige Infrarotstrahlung (Wellenlängenbereich von 1,0 bis 1,5  $\mu\text{m}$ ), mittelwellige Infrarotstrahlung (Wellenlängenbereich von 1,5 bis 2,5  $\mu\text{m}$ ) und langwellige Infrarotstrahlung (Wellenlängenbereich von 3 bis 10  $\mu\text{m}$ ) eingeteilt [2][33].

Das Trocknen durch NIR- und IR-Strahlung weist ähnliche Anwendungsaspekte auf:

- a) Je kurzwelliger die IR-Strahlung, desto
  - höher ist die Strahlertemperatur
  - größer ist der Anteil der direkt im Lackfilm wirksamen Strahlungsenergie und desto niedriger die der weniger wirksamen Konvektionswärme
  - höher ist die Wärmeübertragungsleistung.
- b) Je dunkler der Farbton, desto stärker wird die Strahlung absorbiert, d.h. desto stärker ist die Aufheizung des Lackfilms.
- c) In Hohlräumen und Nischen, die der Strahlung nur indirekt zugänglich sind, verläuft die Trocknung langsamer. Das bedeutet, dass Infrarot-Trocknung und NIR-Trocknung nicht für komplexe Werkstückgeometrien anwendbar sind [2].

Die Vorteile der IR-Trocknung im Vergleich zur Umluft (Konvektions-)Trocknung bestehen in

- a) einer schnelleren Aufheizung des Lacks,
- b) einer schnelleren Rückkühlung, da die Wärme bei der kürzeren Beanspruchung nicht so tief in den Untergrund eindringt, und damit auch gleichzeitig eine geringere thermische Belastung des Substrates,
- c) einer schnelleren Betriebsbereitschaft der Trocknungsanlage,

- d) einem höheren Durchsatz,
- e) einem geringeren Energieaufwand. Durch geeignete Strahler erreicht der Erwärmungsprozess ohne große Energie-Streuverluste einen hohen Wirkungsgrad,
- f) einer Platzersparnis durch kleinere Trocknungsanlage sowie
- g) der Anpassungsmöglichkeit der Anlagentechnik auch an kleine zu trocknende Flächen [2][34].

Die Nachteile der IR-Trocknung im Vergleich zur Umluft- (Konvektions-)Trocknung lassen sich wie folgt zusammenfassen

1. wie bereits unter dem Punkt Anwendungsaspekte erwähnt, ist die Infrarot-Trocknung nicht für komplexe Werkstückgeometrien anwendbar [2] und
2. die schnellere Aufheizung bewirkt engere Einbrennfenster und damit eher die Gefahr des Überbrennens.

Die NIR-Trocknung weist die gleichen Vor- und Nachteile im Vergleich zur Konvektions-Trocknung wie die IR-Trocknung auf. Die Vor- und Nachteile sind jedoch bei der NIR-Trocknung noch stärker ausgeprägt.

Die Vorteile der NIR-Trocknung lassen sich quantitativ belegen, indem man die Energie-Dichten der unterschiedlichen Heizfäden, wie sie in Tabelle 2 dargestellt sind, miteinander vergleicht.

Die von einem schwarzen Körper ausgehende Strahlung hat eine Leistung  $P$ , die der strahlenden Fläche  $A$  und der 4. Potenz der Körpertemperatur  $T$  proportional ist. Der Proportionalitätsfaktor ist als Stefan-Boltzmann-Konstante (Strahlungskonstante)  $\sigma$

bekannt:  $\sigma = 5,67051 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$  [35].

Ein Heizfaden kann als nicht-schwarzer Körper angesehen werden. Für diesen gilt unter Berücksichtigung des Emissionsgrades nicht-schwarzer Körper  $\varepsilon$  das Stefan-Boltzmann-Gesetz für nicht-schwarze Körper, das die folgende Form hat:

$$P = A \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4$$

**Formel 1**

Parallel absorbiert der strahlende Körper eine von der Umgebung ausgehende Strahlung mit der in Formel 2 berechneten Leistung

$$P = A \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \text{ [35]}$$

**Formel 2**

Unter der Prämisse, dass strahlende und absorbierende Fläche gleich groß sind, lautet das Stefan-Boltzmann-Gesetz für einen IR-Strahler:

$$P = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4), \text{ wobei } A = \text{Fläche des Strahlers}$$

$T_1$  = Temperatur des Heizfadens

$T_2$  = Umgebungstemperatur

**Formel 3**

Die übertragene Strahlungsenergie ist umso größer, je höher die Strahlertemperatur [36] ist. Die höhere Temperatur des Heizfadens der NIR Emitter hat, wie aus der Formel 3 ersichtlich, den größten Einfluss, da die Heizfaden-Temperatur mit der 4. Potenz in die Formel eingeht [35]· [37].

NIR- Emitter [38], [39] erreichen eine Heizfaden-Temperatur von rund 3000°C [40]. Kurzwellige IR-Strahler umfassen den Heizfaden-Temperaturbereich von 2000°C-2500°C, mittelwellige IR-Strahler von 850°C-1200°C und langwellige IR Emitter von 500°C bis 750°C [41].

Um die Leistung von NIR-Emittern mit der von unterschiedlichen IR-Strahlern zu vergleichen, wurden die entsprechenden Leistungen unter den Voraussetzungen eines schwarzen Strahlers ( $\varepsilon=1$ ), einer Umgebungstemperatur von 0°C ( $T_2=273,15\text{K}$ ) und einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> ( $A=1 \text{ m}^2$ ) berechnet (siehe Tabelle 2)

Emitter-Typ	T[K]	Leistung [W]
NIR	3273	4600000
Kurzwelliges IR	2773	2200000
Mittelwelliges IR	1473	120000
Langwelliges IR	1023	18000

**Tabelle 2: Typische Leistungen der verschiedenen Emitter-Typen**

NIR Strahler erzeugen, wie in Tabelle 2 ersichtlich, eine sehr viel größere Leistung als konventionelle Infrarot-Strahler. Durch diese sehr hohe Leistung sind sehr hohe Aufheizraten und damit auch sehr viel kürzere Aushärtungszeiten möglich.

NIR-gehärtete Pulverbeschichtungen weisen nach Bär trotz dieser kürzeren Aushärtungszeit eine hohe Produktqualität bzgl. Abriebfestigkeit, Härte und Chemikalienbeständigkeit auf [42]. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen sollen in dieser Arbeit Pulverbeschichtungen, die sowohl mittels NIR-Strahlung als auch konventionell ausgehärtet wurden, bzgl. ihrer Glasübergangstemperaturen und ihrer IR-Spektren miteinander verglichen werden.

## **2.4 Untersuchung von Pulverlacken**

### *Bestimmung der Gelzeit*

Zu den speziellen Prüfungsmethoden bei Pulverlacken zählt die Gelzeitmessung. Die Gelzeit ist die Zeit in Sekunden, die eine Pulverlackschmelze nach Ablauf des Schmelzprozesses bei einer gegebenen Temperatur benötigt, um zu vernetzen. Dies äußert sich in einem abrupten Wechsel der gut zu rührenden Schmelze zu einem gummiartigen Zustand [2].

### *Bestimmung der Glasübergangstemperatur*

Um den Vernetzungsgrad und damit die Güte der Lackschicht zu bestimmen, kann der Lack /das Polymer unterhalb einer bestimmten Temperatur, der sog. Einfrier- oder Glasübergangstemperatur  $T_G$ , als ein hartes Glas angesehen werden. Wird es über diese Glasübergangstemperatur hinaus erhitzt, erlangen einzelne Segmente des Polymeren eine gewisse Beweglichkeit. Eine Konsequenz ist, dass das Polymere weich und kautschuk-elastisch wird.

Die Glasübergangstemperatur weist aufgrund der großen Zahl von Netzknoten je Volumeneinheit und der damit eingeschränkten Segmentbeweglichkeit einen großen Wert auf und liegt oberhalb der Anwendungstemperatur. Eine direkte Ermittlung molekularer Parameter ist mit etablierten Methoden nicht oder nur mit Einschränkungen möglich. Daher werden meist empirisch erhaltene Zusammenhänge zwischen messbaren Eigenschaften und molekularen Parametern zur Netzwerkbeschreibung, neben mechanischen Größen z.B. auch die Glastemperatur, verwandt. Bei der Bildung von hochvernetzten Polymeren sind die Endeigenschaften auch vom technologischen Ablauf der Vernetzungsreaktion abhängig [43].

Die Vernetzungsdichte  $\rho$ , auch als Vernetzungsgrad bekannt, ist durch den Quotienten aus der Molzahl vernetzter Grundbausteine pro Gewichts- oder Volumeneinheit ( $\nu$ ) und der Molzahl aller Grundbausteine pro Gewichts- oder Volumeneinheit ( $N_0$ ) definiert. Bei dieser Definition werden die Grundbausteine bzgl. ihrer Vernetzbarkeit als gleichwertig betrachtet [44].

$$\rho = \frac{\nu}{N_0} \quad [44]$$

#### Formel 4

Die Glasübergangstemperatur ist unter anderem abhängig von der chemischen Natur des Makromoleküls, von der Konfiguration, vom kristallinen Anteil, von der Seitenketten-Länge, dem Verzweigungsgrad und von der angewandten Meßmethode. Die Bestimmung der Glasübergangstemperatur erfolgt durch Messung bestimmter physikalischer Größen, wie z.B. des Elastizitätsmoduls oder der Wärmekapazität, deren Werte sich bei Erreichen der Glasübergangstemperatur sprunghaft ändern.

Bei amorphen Makromolekülen sind oft Glasübergangstemperatur und Erweichungstemperatur identisch. Bei kristallinen Polymeren hingegen ist der Kristallitschmelzpunkt sehr viel höher als die Glasübergangstemperatur. Die Glasübergangstemperatur beträgt etwa zwei Drittel des Kristallitschmelzpunktes (in Kelvin).

Als Untersuchungsmethoden zur Messung der Glasübergangstemperatur kommen die dynamisch-mechanische Analyse (DMA) und die Differential- Thermoanalyse (DTA bzw. DSC) zur Anwendung[45].

### 2.4.1.1 Dynamische Differenz-Kalorimetrie (DDK, englisch „Differential Scanning Calorimetry“ (DSC))

#### Abgrenzung der dynamischen Differenz-Kalorimetrie von der Differenz-Thermoanalyse

Bei einer Differenz-Thermoanalyse erfolgt die Aufzeichnung von chemischen Reaktionen bzw. physikalischen Umwandlungsprozessen mittels Temperaturdifferenzen zwischen der Proben- und einer Referenzsubstanz. Diese Temperaturdifferenzen bewirken Wärmeflüsse, die wiederum die Temperaturdifferenz-Kurven (DTA-Kurven) stark beeinflussen.

Im Gegensatz dazu werden bei der dynamischen Differenz-Kalorimetrie Proben- und Referenzsubstanz durch die individuell abhängige Wärmezufuhr auf gleicher Temperatur gehalten. Die dazu benötigte Wärmerate ( $dH/dt$ ) wird in Abhängigkeit von der Temperatur gemessen. Die DDK ist besonders für quantitative Untersuchungen bzgl. abgegebener bzw. aufgenommener Reaktionsenthalpien, die der Signalhöhe direkt proportional sind, geeignet. Des Weiteren ist die Signalhöhe direkt proportional zur Reaktionsgeschwindigkeit.

Die theoretische Basis der dynamischen Differenz-Kalorimetrie stellt die folgende Gleichung dar:

$$\frac{dH}{dt} = \underbrace{-\frac{dq}{dt}}_{1. \text{ Term}} + \underbrace{(C_P - C_R) \cdot \frac{dT_P}{dt}}_{2. \text{ Term}} - \underbrace{R \cdot C_P \frac{d^2q}{dt^2}}_{3. \text{ Term}},$$

#### Formel 5

Wobei H = Enthalpie,

t = Zeit,

q = Wärmemenge,

$C_P$  = Wärmekapazität der Probe,

$C_R$  = Wärmekapazität der Referenzsubstanz

R = Gaskonstante

Der 1. Term gibt die zeitlich differenzierte Wärmeentwicklung wieder. Die Verschiebung der Basislinie von der Null-Linie wird im 2. Term berücksichtigt. Der 3. Term

der Gleichung stellt die Steigung der Kurve an jedem beliebigen Punkt, multipliziert mit der Konstanten  $R \cdot C_p$ , dar. Die Abhängigkeit der zeitlichen Enthalpieänderung berechnet sich also durch drei Terme, die bis auf zwei Unterschiede auch für die Differenz-Thermoanalyse Gültigkeit haben.

Ein Unterschied zur Differenz-Thermoanalyse ist, dass bei der dynamischen Differenz-Kalorimetrie auch Änderungen der thermischen Leitfähigkeit direkt erfassbar sind.

Die Wärmeleitfähigkeit findet sich nur im 3. Term wieder, für die DDK ist die Fläche unter der Kurve gleich  $-\Delta H$ . Um quantitative Auswertungen durchzuführen, ist ein Kalibrierfaktor zur Umrechnung der Fläche aus elektrischen Messgrößen in Wärmeinheiten (Joule) von Nöten. Bei der DTA fehlt dieser elektrische Umrechnungsfaktor, stattdessen steht eine thermische Konstante. Mit der DDK sind endo- und exotherme Prozesse und Unterschiede in der Wärmekapazität (spezifische Wärme) gut erfassbar. Apparative Größen, die die Ergebnisse der DTA ungünstig beeinflussen, haben bei der DDK einen geringeren Einfluss. Quantitative, d.h. kalorimetrische Messungen sind nur mittels DDK durchführbar, wenn die Wärmeübertragungsmechanismen innerhalb eines Kurvenverlaufs unverändert bleiben. Bei bekannter spezifischer Wärme der Referenzsubstanz kann die Wärmekapazität einer Probensubstanz über einen relativ großen Temperaturbereich ermittelt werden<sup>[46]</sup>.

### Messprinzipien der dynamischen Differenz-Kalorimetrie

Kalorimeter werden zur Messung von Wärme verwendet<sup>[46]</sup>. Bei der dynamischen Differenz-Kalorimetrie wird die Differenz der Wärmeströme vom Heizelement zur Probe und vom Heizelement zur Referenzsubstanz als Funktion der Temperatur oder der Zeit gemessen. Das gemessene Signal, d.h. die Fläche unter einem Peak der Wärmestromdifferenz-gegen-Zeit-Kurve, ist direkt proportional der aufgenommenen bzw. abgegebenen Wärme.

Das im experimentellen Teil dieser Arbeit eingesetzte dynamische Differenz-Kalorimeter zählt zu den Wärmefluss-Differenz-Kalorimetern. Referenz- und Probenzelle befinden sich hierbei in symmetrischer Anordnung innerhalb eines kalorimetri-

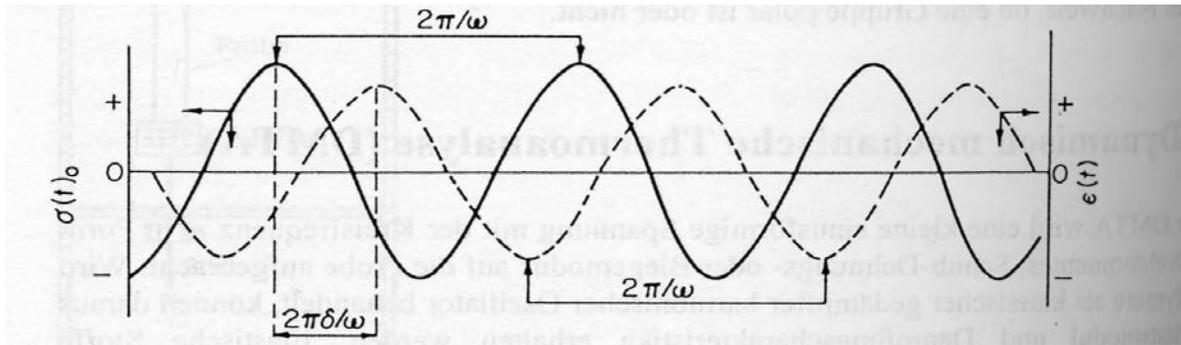
schen Blocks, der von einem einzigen Ofen umgeben wird. Dieser Ofen wird mit konstanter Heizrate aufgeheizt. Das hier angewandte Gerät misst nach dem Boersma-Prinzip, d.h. Probe und Referenzsubstanz befinden sich symmetrisch zum Ofenmittelpunkt auf einer wärmeleitenden Scheibe. Vom Ofen ausgehend fließen Wärmeströme in die Probe und in die Referenzsubstanz. Die Temperaturdifferenz zwischen Referenzsubstanz und Probe wird durch entgegengesetzt geschaltete Thermoelemente gemessen. Ein in der Probenzelle auftretender Wärmeeffekt bewirkt die Temperaturdifferenz, die direkt proportional der Wärmeflussdifferenz ist [47].

#### 2.4.1.2 *Dynamisch mechanische Analyse (DMA) oder dynamisch mechanische Thermoanalyse (DMTA)*

Bei der DMTA erfährt die zu vermessende Polymer-Probe eine geringfügige sinusförmige Spannung mit der Kreisfrequenz  $\omega$  in Form eines Drehmomentes, Schub-Dehnungs- oder Biegemodus. Nimmt man dabei an, dass es sich bei dem Polymer um einen klassischen gedämpften harmonischen Oszillator handelt, können durch die DMTA Elastizitätsmodul und Dämpfungscharakteristika erhalten werden. Elastische Stoffe transferieren mechanische Arbeit in umwandelbare potentielle Energie um. Flüssige Stoffe fließen, wenn sie einer Spannung unterworfen werden; es erfolgt keine Energiespeicherung, sondern eine fast vollständige Umwandlung in Wärme, Flüssigkeiten besitzen also hohe Dämpfungswerte.

Viskoelastische Polymere weisen sowohl elastisches als auch Dämpfungsverhalten auf. Wenn deshalb auf einen linearen viskoelastischen Stoff eine sinusförmige Spannung einwirkt, wird die resultierende Spannung, wenn auch phasenverschoben, ebenfalls sinusförmig sein, wenn das Polymer eine Dämpfung oder eine Energiedissipation zeigt.

Die Anwendung einer sinusförmigen Spannung auf ein Maxwell-Element bewirkt eine sinusförmige Dehnung derselben Frequenz wie die Spannung, allerdings phasenverschoben (siehe Abbildung 18).



**Abbildung 18: Harmonisches Oszillieren eines Maxwell-Elements. Die durchgezogene Linie steht für die Spannungskurve, die gestrichelte Linie für die Dehnungskurve [6]**

Die resultierende Dehnung kann mit der Kreisfrequenz  $\omega$  und dem Amplitudenmaximum  $\varepsilon_0$  durch die Formel

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \exp(i\omega t)$$

**Formel 6**

beschrieben werden, wobei

$$\omega = 2\pi\nu, \quad \nu = \text{Frequenz}$$

**Formel 7**

und

$$i = -1^{1/2}$$

**Formel 8**

Die Beziehung zwischen alternierender Spannung und Dehnung ist gegeben durch

$\sigma^* = \varepsilon^* E^*(\omega)$ , wobei  $E^*(\omega)$  der frequenzabhängige komplexe dynamische Modul ist.

**Formel 9**

Der frequenzabhängige komplexe dynamische Modul ist definiert durch:

$$E^*(\omega) = E'(\omega) + i E''(\omega),$$

**Formel 10**

d.h.  $E^*(\omega)$  setzt sich aus zwei frequenzabhängigen Komponenten zusammen:  $E'(\omega)$  ist der mit der Dehnung in Phase laufende Realteil, und  $E''(\omega)$  ist der Verlustmodul. Der Verlustmodul ist definiert als das Verhältnis der gegenüber der Amplitude der Spannung phasenverschobenen  $90^\circ$ -Komponente zu der Amplitude der Spannung selbst.

Daher misst  $E'(\omega)$  die gespeicherte Energie und  $E''(\omega)$  ist eine Größe zur Ermittlung der vom Stoff dissipierten Energie.

Für das Maxwell-Modell gilt die folgende Formel:

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{E'\omega^2\tau^2}{1+\omega^2\tau^2} + \frac{iE''\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2}$$

**Formel 11**

Die Bestimmung der Dämpfung im System oder des Energieverlust pro Zyklus kann über die Messung des Verlustwinkels  $\tan\delta$ , der ein Maß für die innere Reibung ist, erfolgen. Für den Verlustwinkel  $\tan\delta$  gilt:

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega\tau} = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)} \quad [6]$$

**Formel 12**

Unter der Bezeichnung „DMA“ werden verschiedene Verfahren zusammengefasst: die Beanspruchung kann als Biege-, Torsions-, Druck- oder Zugschwingung auf die Probe einwirken, und zwar in Form freier oder kontinuierlicher erzwungener Schwingungen in Resonanz- und Festfrequenz. Aufgrund dessen werden verschiedene apparative Varianten unterschieden [48]:

1) Freie Schwingung:

Der Probekörper ist an dem einen Ende fest eingespannt und am anderen Ende mit einer Schwungscheibe um einen festen Winkel  $<3^\circ$  ausgelenkt. Der Probekörper wird zu freien gedämpften Schwingungen angeregt, die dann frei abklingen. Aus den Amplituden der Abklingkurve kann die mechanische Dämpfung ermittelt werden. Aus der temperaturabhängig resultierenden Schwingungsfrequenz kann das Speichermodul berechnet werden [48].

2) Erzwungene Schwingung in Resonanz:

Der an beiden Enden eingespannte Probekörper wird zu Schwingungen unter Biegebeanspruchungen kontinuierlich so angeregt, dass sich eine temperaturabhängige Resonanzfrequenz des schwingenden Systems mit konstanter Amplitude ergibt.

Aus dieser Resonanzfrequenz kann der Speichermodul ermittelt werden. Die mechanische Dämpfung resultiert aus der zur Aufrechterhaltung der Amplitude notwendigen Anregungskraft [48].

### 3) Erzwungene Schwingung mit fester Frequenz

Der an beiden Enden eingespannte Probekörper wird zu erzwungenen Schwingungen mit konstanter Frequenz kontinuierlich angeregt. Dabei sind zwei Varianten möglich:

- (1) „dehnungsgeregelte Varianten“: Es wird eine feste Auslenkung vorgegeben. Für diese kann dann die benötigte Kraft ermittelt werden
- (2) „kraftgeregelte Varianten“: die Auslenkung resultiert aus der vorgegebenen Kraft.

Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Apparatur ist ein DMA-Gerät mit erzwungener Schwingung mit fester Frequenz, wobei eine feste Auslenkung vorgegeben wird. Die Größe der Anregungskraft bzw. der Auslenkung beeinflusst den Speichermodul. Aus der Phasenverschiebung zwischen Anregung und Auslenkung kann die mechanische Dämpfung ermittelt werden [48].

## *Infrarot-Spektroskopische Untersuchungen*

Um die Polymer-Strukturen der ausgehärteten Lacke vergleichend zu untersuchen, wurden sie infrarotspektroskopisch vermessen, d.h. die Infrarotstrahlung wurde nicht nur zur Aushärtung der Lacke, sondern auch zur Strukturanalytik eingesetzt.

### *2.4.1.3 Theoretische Grundlagen*

Durch Absorption von Lichtenergie im Bereich von 0,8 bis 500  $\mu\text{m}$  werden in einem Molekül unterschiedliche Schwingungen angeregt [49].

Um die Energie der Schwingung zu ermitteln, kann das Modell des harmonischen Oszillators verwendet werden, dessen potentielle Energie eine Funktion des Kernabstandes  $r$  ist:

$$V(r) = \frac{1}{2}kx^2 = 2\pi^2\mu f_{osc}^2 \cdot x^2,$$

**Formel 13**

wobei V = potentielle Energie

k = Kraftkonstante

x = Auslenkung

$\mu = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$  = reduzierte Masse

**Formel 14**

$f_{osc}$  = Schwingungsfrequenz des Oszillators

Damit ergibt sich für die Schwingungsfrequenz eines zweiatomigen Moleküls

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

**Formel 15**

Das Modell des harmonischen Oszillators ist stark idealisiert, und kommt derart in der Realität nicht vor. Aus diesem Grund wird meist das Modell des anharmonischen Oszillators angewandt.

Im molekularen Bereich erfolgt Energie- bzw. Strahlungsabsorption immer in Quanten, d.h. es gibt nur diskrete Energie- und damit Schwingungszustände. Mit der Schrödinger-Gleichung resultiert damit für den anharmonischen Oszillator:

$$E_{vib} = hf_{osc} \left( n + \frac{1}{2} \right) = \frac{h}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}} \left( n + \frac{1}{2} \right) \text{ mit}$$

n = Schwingungsquantenzahl=0,1,2,....

$$\Delta E_{vib} = E_{n+1} - E_n = hf_{osc}$$

$f_{osc}$  = Oszillatorfrequenz

h = Plancksches Wirkungsquantum

$E_{vib}$  = Schwingungsenergie

Der Abstand zwischen benachbarten Schwingungsniveaus verringert sich mit steigendem  $n$ , bis schließlich die Dissoziationsenergie erreicht ist [50][51][52].

#### 2.4.1.4 Infrarot- Spektrometer

##### Klassische Infrarot-Spektrometer

Klassische Infrarot-Spektrometer funktionieren oft nach dem Zweistrahlprinzip: ein Strahlteiler zerteilt die kontinuierliche Strahlung der Lichtquelle in zwei gleich intensive Lichtbündel. Das eine Bündel wird durch die Probe geführt, das andere Bündel fungiert als Vergleichsstrahl und durchläuft im Allgemeinen Luft. Nach dem optischen Nullabgleich im Photometer erfolgt die Wiedervereinigung der Lichtbündel. Der Monochromator, ein Prisma oder ein Beugungsgitter, zerlegt die resultierende Strahlung spektral, um das Spektrum mit einem Detektor nach Wellenlängen abfahren zu können, wobei zu jedem Zeitpunkt nur Licht einer Wellenlänge aufgezeichnet wird. Nach Verstärkung werden die Signale als Spektrum aufgezeichnet [50].

##### Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer

Beim Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometer sollen alle Frequenzen des IR-Spektrums im Detektor simultan erfasst werden. Zu diesem Zweck werden die zu allen Zeitpunkten gleich intensiven, polychromatischen IR-Strahlen der Lichtquelle mittels eines bewegten Interferometers in ein zeitabhängiges Interferogramm umgewandelt. Nach Durchgang der Strahlung durch die Probe wird das Interferogramm durch eine mathematische Operation, die sog. Fourier- Transformation, in ein Spektrum rückübersetzt.

Das Herzstück des Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometers ist ein Michelson- Interferometer; in ihm trifft die IR-Strahlung auf eine halbdurchlässige Platte (mit Germanium beschichtetes KBr oder CsI), die als Strahlteiler dient. Die eine Hälfte der Strah-

lung wird auf einen fixierten Spiegel abgelenkt, die andere Hälfte trifft auf einen beweglichen Spiegel, dessen Abstand zur Interferometerplatte variiert werden kann. Beide Spiegel reflektieren die Strahlung zur Platte, auf der Interferenz eintritt. Aufgrund der polychromatischen IR-Strahlung und der Bewegung des Spiegels bildet das resultierende Interferogramm eine Überlagerung bzw. Aufsummierung der Interferogramme aller Frequenzen. Die modulierte Strahlung wird durch die Probe geführt. Es erfolgt dabei entsprechend den angeregten Schwingungen eine selektive Absorption. Der Detektor zeichnet die ankommende IR-Strahlung als Interferogramm auf, wandelt die optischen Signale in elektrische um und leitet sie an den Datenspeicher weiter. Ein Computer zerlegt die durch Fourier-Transformation aufsummierte Frequenzinformation wieder in Einzelfrequenzen und erzeugt das gewohnte, interpretierbare Bandenspektrum [50].

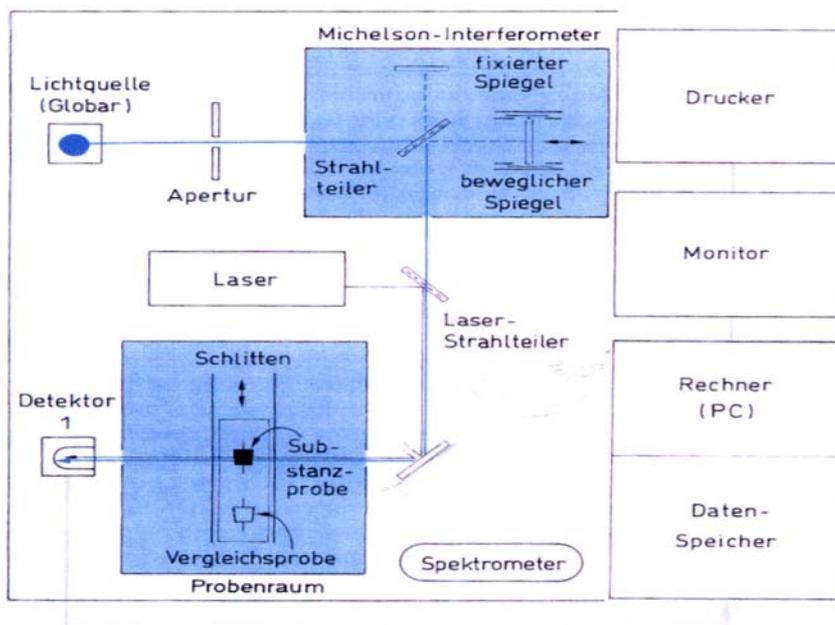


Abbildung 19: Prinzipieller Aufbau eines Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometers [50]

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Beschleunigung der Epoxy-Carboxy-Reaktion in NIR- Pulverlacksystemen

In dieser Arbeit werden NIR-aushärtbare Hybrid-Pulverlacke, an die keine besonderen Anforderungen hinsichtlich Vergilbungsresistenz gestellt werden, mit verschiedenen Phosphoniumsalz-Beschleunigern in verschiedenen Konzentrationen entwickelt und anschließend untersucht. Von den Pulverlacken werden die Gelzeiten, die Reaktion-senthalpien der Epoxy-Carboxy-Reaktion sowie die NIR-Mindestbestrahlzeiten be-stimmt.

##### 3.1.1 Gelzeitmessungen

Die Ergebnisse der Gelzeitmessungen bei 185°C der Lacke mit verschiedenen Phosphoniumsalz-Beschleunigern bei unterschiedlichen Konzentrationen sind kompa-rativ in Abbildung 20 zusammengefasst. Bei 185°C ergibt sich die Reihenfolge: Lacke mit Beschleuniger B < Lacke mit Beschleuniger D < Lacke mit Beschleuniger C <La-cke mit Beschleuniger A.

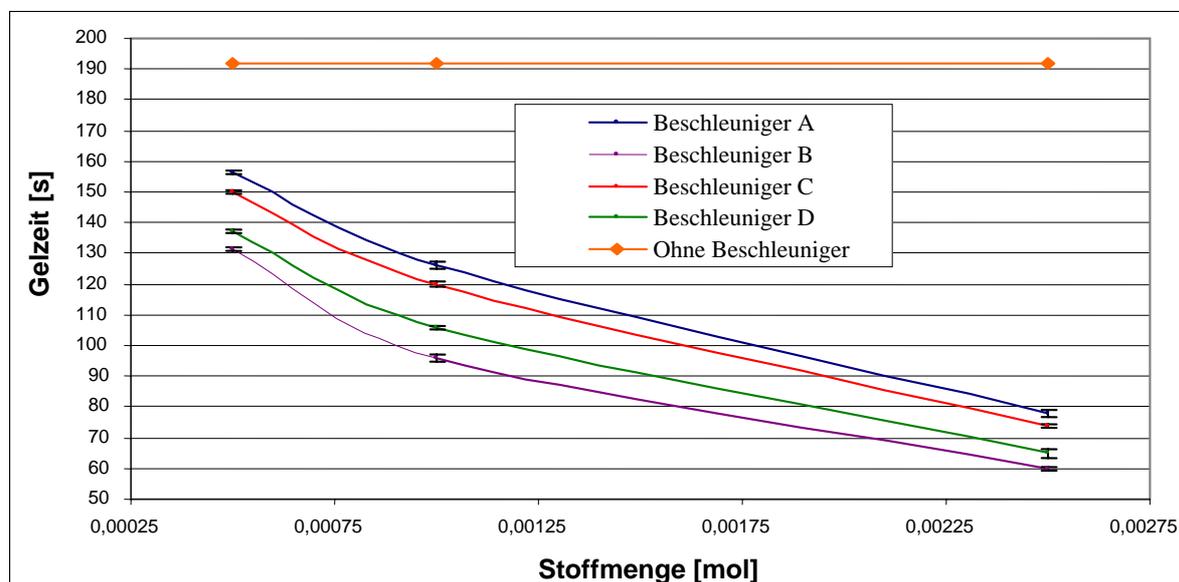
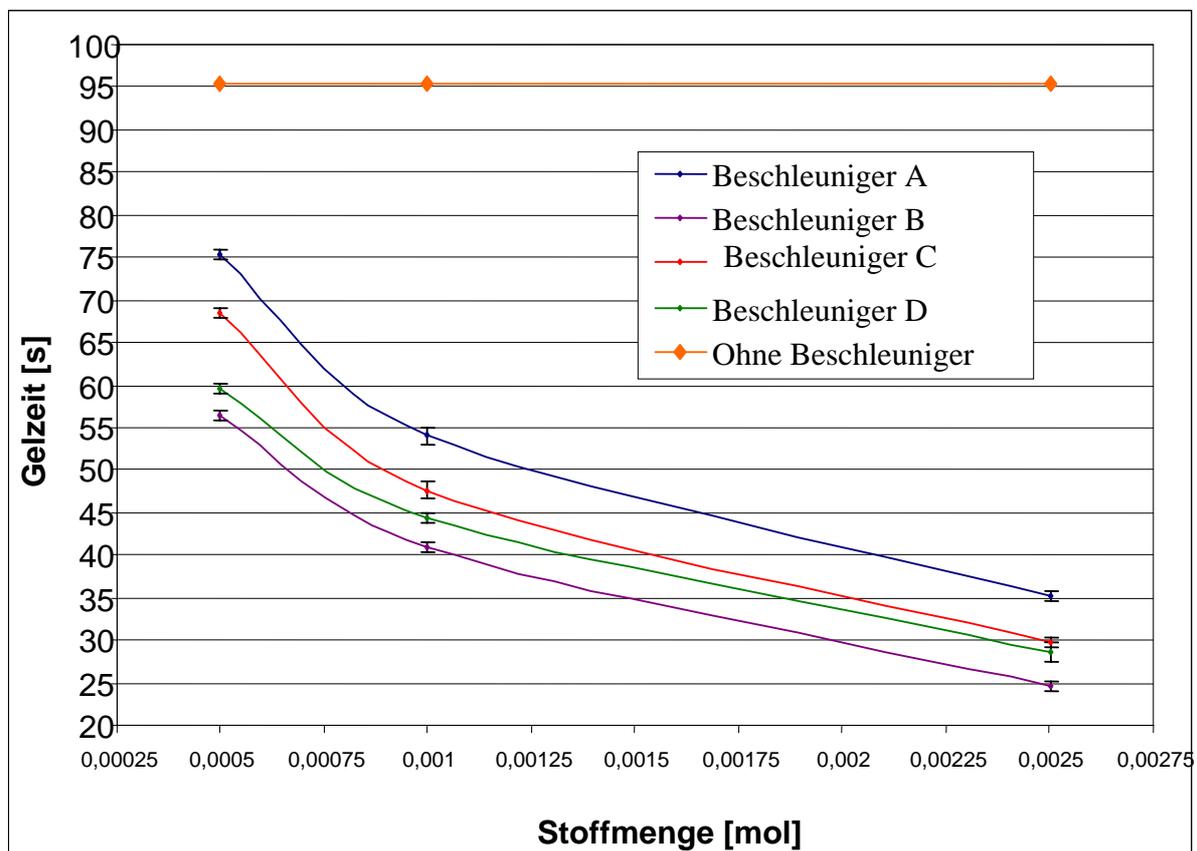


Abbildung 20: Vergleichende Übersicht der Gelzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern bei 185°C <sup>2</sup>

<sup>2</sup> Die Fehlerbalken in Abbildung 20 ergeben sich aus der Standardabweichung des jeweiligen Wertes (s. Anhang).

Weiterhin bewirkt eine Erhöhung der Beschleuniger-Stoffmenge ausgehend von 0,0005 mol bis 0,0025 mol Beschleuniger pro 455 g Ansatzgröße (Rezepturen siehe experimenteller Teil) eine Erniedrigung der Gelzeit, wobei der Effekt, wie in Abbildung 20 ersichtlich, im Bereich 0,0005 mol bis 0,001 mol stärker ausgeprägt ist als im Bereich 0,001 mol bis 0,0025 mol.

Ähnliche Resultate wurden bei auch bei 215°C gefunden (siehe Abbildung 21).



**Abbildung 21: Vergleichende Übersicht der Gelzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern bei 215°C<sup>3</sup>**

<sup>3</sup> Die Fehlerbalken in Abbildung 21 ergeben sich aus der Standardabweichung des jeweiligen Wertes (s. Anhang).

### 3.1.2 Bestimmung der Reaktionsenthalpien

In Tabelle 3 sind die Reaktionsenthalpien der Epoxy-Carboxy-Reaktion der Pulverlacke mit Beschleuniger A, Beschleuniger B, Beschleuniger C und Beschleuniger D in jeweils drei verschiedenen Stoffmengen (0,0005 mol, 0,001 mol und 0,0025 mol pro 455 g Ansatzgröße) ersichtlich. Die Reaktionsenthalpien wurden mittels DSC bestimmt. Die erhaltenen DSC-Aufnahmen sind im Anhang zusammengefasst.

Mit Beschleuniger B als Beschleuniger ergeben sich die betragsmäßig größten Reaktionsenthalpien. Die Lacke mit Beschleuniger D haben die betragsmäßig zweitgrößten, die mit Beschleuniger C die betragsmäßig drittgrößten und die mit Beschleuniger A die betragsmäßig geringsten Reaktionsenthalpien.

Weiterhin bewirkt eine Erhöhung der Beschleuniger-Stoffmenge ausgehend von 0,0005 mol bis 0,0025 mol eine betragsmäßige Erhöhung der Reaktionsenthalpien, wobei der Effekt, wie in Tabelle 3 ersichtlich, im Bereich 0,0005 mol bis 0,001 mol stärker ausgeprägt ist als im Bereich 0,001 mol bis 0,0025 mol.

Probenname	Beschleuniger	Beschleunigermenge [mol]	Reaktionsenthalpie [J/g]
F58- 1	-	0	-14,66
F58- 2	Beschleuniger A	0,0005	-18,98
F58- 3	Beschleuniger A	0,001	-21,59
F58- 4	Beschleuniger A	0,0025	-24
F58- 5	Beschleuniger B	0,0005	-19,44
F58- 6	Beschleuniger B	0,001	-23,72
F58- 7	Beschleuniger B	0,0025	-26,03
F58- 8	Beschleuniger C	0,0005	-19,11
F58- 9	Beschleuniger C	0,001	-22,17
F58- 10	Beschleuniger C	0,0025	-24,34
F58- 11	Beschleuniger D	0,0005	-19,31
F58- 12	Beschleuniger D	0,001	-23,4
F58- 13	Beschleuniger D	0,0025	-25,33

**Tabelle 3: Bestimmung der Reaktionsenthalpien der Pulver mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern**

Dieses Ergebnis ist erstaunlich, da sich die Reaktionsenthalpie als thermodynamische Größe durch den Einsatz von Beschleunigern nicht verändern sollte. Eine mögliche Erklärung für das erhaltene Ergebnis ist, dass die Reaktion durch die verschiedenen Beschleuniger quantitativ unterschiedlich verläuft, d.h. dass der Umsetzungsgrad

unterschiedlich ist, und damit die Reaktion beim Einsatz von Beschleunigern vollständiger abläuft als ohne Beschleuniger.

### 3.1.3 Mindestbestrahlzeiten mittels NIR

Außerdem wurden die Mindest-NIR-Bestrahlzeiten der Lacke mit den vier untersuchten Beschleunigern in jeweils drei verschiedenen Stoffmengen (0,0005 mol, 0,001 mol und 0,0025 mol) ermittelt. Die Bestimmung der Mindest-Bestrahlzeit dient als Maß für die Reaktionsgeschwindigkeit, d.h. wie lange muss das Lacksystem bestrahlt werden, um eine Umsetzung, die den qualitativen Anforderungen genügt, zu erreichen. Mit Beschleuniger B als Beschleuniger ergeben sich die kürzesten Mindest-Bestrahlungszeiten. Die Lacke mit Beschleuniger D haben die zweitkürzesten, die mit Beschleuniger C die drittkürzesten und die mit Beschleuniger A die längsten Mindest-Bestrahlungszeiten.

Weiterhin bewirkt eine Erhöhung der Beschleuniger-Stoffmenge ausgehend von 0,0005 mol bis 0,0025 mol Beschleuniger pro 455 g Ansatzgröße eine Erniedrigung der Mindest-Bestrahlungszeiten, wobei der Effekt, im Bereich 0,0005 mol bis 0,001 mol stärker ausgeprägt ist als im Bereich 0,001 mol bis 0,0025 mol.

<u>Proben-Name</u>	<u>Beschleuniger</u>	<u>Stoffmenge Beschleuniger [mol]</u>	<u>Geschwindigkeit [mm/s]</u>	<u>Aushärtungszeit [s]<sup>4</sup></u>	<u>Glasübergangstemperatur [°C]</u>
F58-2	Beschleuniger A	0,0005	20	12,5	77,11
F58-3	Beschleuniger A	0,001	22	11,36	78,01
F58-4	Beschleuniger A	0,0025	23	10,87	77,75
F58-5	Beschleuniger B	0,0005	25	10	76,8
F58-6	Beschleuniger B	0,001	27	9,26	76,91
F58-7	Beschleuniger B	0,0025	29	8,62	77,74
F58-8	Beschleuniger C	0,0005	21	11,90	77,92
F58-9	Beschleuniger C	0,001	24	10,42	76,27
F58-10	Beschleuniger C	0,0025	26	9,62	78,12
F58-11	Beschleuniger D	0,0005	22	11,36	77,15
F58-12	Beschleuniger D	0,001	25	10	76,67
F58-13	Beschleuniger D	0,0025	27	9,26	78,63

**Tabelle 4: Einbrennparameter bei der Ermittlung von Mindestbestrahlzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern (ausgehärtet)**

<sup>4</sup> Die Aushärtungszeit t berechnet sich aus:  $t = \text{Bestrahlungslänge} / \text{Geschwindigkeit}$ , die Bestrahlungslänge entspricht der Emitterlänge von 250 mm  $\Rightarrow t = 250 \text{ mm} / \text{Geschwindigkeit [mm/s]}$

## 3.2 Vergleich NIR-ausgehärtete NIR-Pulverlacke und konventionell ausgehärtete NIR-Pulverlacke

Im Rahmen dieser Arbeit soll geprüft werden, ob NIR-ausgehärtete Pulverlacke ähnliche Glasübergangstemperaturen und ähnliche Strukturen bezüglich IR-Spektren aufweisen wie konventionell ausgehärtete Pulverlacke.

### 3.2.1 Bestimmung der Glasübergangstemperatur

#### 3.2.1.1 Bestimmung der Glasübergangstemperatur von NIR härtbaren Pulverlacken mittels DSC

Der Lack „NIR3-1113“ auf Hybrid-Bindemittel-Basis wurde sowohl konventionell im Umluftofen als auch mit NIR-Strahlung ausgehärtet. Bei der Aushärtung mittels NIR-Strahlung wurden unterschiedliche NIR-Emitter und unterschiedliche Leistungseinstellungen der NIR-Emitter verwendet. Nach der Aushärtung wurden die Glasübergangstemperaturen der jeweiligen Lackprobe mittels DSC bestimmt. Wie in Tabelle 5 ersichtlich, weisen die Glasübergangstemperaturen der unterschiedlich ausgehärteten Pulverlackproben von „NIR3-1113“ keine signifikanten Unterschiede auf.

Aushärtungsart <sup>5</sup>	Thermisch	Normalburn-Emitter (100% Leistung)	Normalburn-Emitter (50% Leistung)	Highburn-Emitter (100% Leistung)	Highburn-Emitter (50% Leistung)	Superburn-Emitter (100% Leistung)	Superburn-Emitter (50% Leistung)	Superburn-Emitter (10% Leistung)
Glasübergangstemperatur T <sub>G</sub> [°C]	69	69	69	70	69	69	69	70

**Tabelle 5: Glasübergangstemperatur (gemessen mittels DSC) des Lacks „NIR3-1113“ auf Hybrid-Bindemittelbasis in Abhängigkeit von der Aushärtungsmethode**

5

Emitter-Typ	Leistung je Emitter [W] bei 100% Leistung
Normalburn	1000
Highburn	2200
Superburn	4400

In Tabelle 6 sind die mittels DSC bestimmten Glasübergangstemperaturen von unterschiedlich ausgehärteten Proben des schwarzen Lacks „NIR1-9270“ zusammengestellt. Der Lack „NIR1-9270“ basiert auf einem Epoxy-Bindemittelsystem. Die Glasübergangstemperaturen sind unabhängig von der Aushärtungsmethode näherungsweise gleich groß.

Aushärtungsart <sup>6</sup>	Thermisch	Normalburn-	Normalburn-	Highburn-	Highburn-
		Emitter (100% Leistung)	Emitter (50% Leistung)	Emitter (100% Leistung)	Emitter (50% Leistung)
Glasübergangstemperatur T <sub>G</sub> [°C]	105	104	105	104	105

**Tabelle 6: Glasübergangstemperatur (gemessen mittels DSC) des Epoxy-Pulverlacks „NIR1-9270“ in Abhängigkeit von der Aushärtungsmethode**

### 3.2.1.2 Bestimmung der Glasübergangstemperatur von NIR-Pulverlacken mittels DMA

In Tabelle 7 sind die mittels DMA bestimmten Glasübergangstemperaturen des Hybrid-basierten Pulverlacks „NIR3-1113“ aufgelistet. Eine Probe wurde konventionell im Umluftofen, die andere Probe mittels NIR-Strahlung ausgehärtet. Die beiden Glasübergangstemperaturen weisen ähnliche Werte auf. Das entsprechende DMA-Diagramm ist im Anhang abgebildet.

Pulverlack	Aushärtungsmethode	Glasübergangstemperatur [°C]
« NIR3-1113 »	NIR, Normalburn-Emitter, 100% Leistung	80
« NIR3-1113 »	thermisch	81

**Tabelle 7: Glasübergangstemperatur (gemessen mittels DMA) des NIR-Pulverlacks NIR3-1113 in Abhängigkeit von der Aushärtungsmethode**

<sup>6</sup>

Emitter-Typ	Leistung je Emitter [W] bei 100% Leistung
Normalburn	1000
Highburn	2200
Superburn	4400

Der Epoxy-basierte Pulverlack „NIR1-9270“ wurde ebenfalls sowohl konventionell im Umluftofen als auch mittels NIR-Strahlung ausgehärtet und anschließend die Glasübergangstemperatur mittels DMA bestimmt. Die gemessenen Temperaturen sind in Tabelle 8 ersichtlich. Sie sind unabhängig von der Aushärtungsmethode gleich groß. Das entsprechende DMA-Diagramm ist im Anhang dargestellt.

Pulverlack	Aushärtungsmethode	Glasübergangstemperatur [°C]
« NIR1-9270 »	NIR, Highburn-Emitter, 100% Leistung	103
« NIR1-9270 »	thermisch	103

**Tabelle 8: Glasübergangstemperatur (gemessen mittels DMA) des NIR-Pulverlacks NIR1-9270 in Abhängigkeit von der Aushärtungsmethode**

### 3.2.2 Vergleich der NIR-Pulverlacke mittels Infrarotspektroskopie

Von den mittels unterschiedlichen Parametern ausgehärteten Hybrid-Pulverlack-Proben „NIR3-1113“ wurden IR-Spektren aufgenommen (siehe Abbildung 22 bis Abbildung 29).

Die Spektren ähneln einander sehr stark. Zwar sind Signale unterschiedlich intensiv, aber die Positionen der Peaks stimmen gut überein. Bei allen Spektren treten breite, strukturierte Absorptionsbanden zwischen 3000 und 3600  $\text{cm}^{-1}$  auf, die den OH-Valenzschwingungen von Carbonsäuren in assoziierter Form zugeordnet werden können [53].

Die C=O Valenzschwingung der Carbonsäuren und Ester tritt bei 1716  $\text{cm}^{-1}$  auf [53]. Die C-O-Valenzschwingungen und die OH-Deformationsschwingungen der Carbonsäuren sind zwischen 1075 und 1440  $\text{cm}^{-1}$  ersichtlich [53].

Offensichtlich bewirkt eine Anwendung von NIR-Strahlung zur Aushärtung des Pulverlacks „NIR3-1113“ keine signifikanten Unterschiede in der Struktur des gebildeten

Lacks. Weiterhin bleibt festzuhalten, dass erstaunlicherweise IR-spektroskopisch kein Unterschied zwischen unausgehärtetem Pulver „NIR3-1113“ und ausgehärtetem Lack „NIR3-1113“ feststellbar ist.

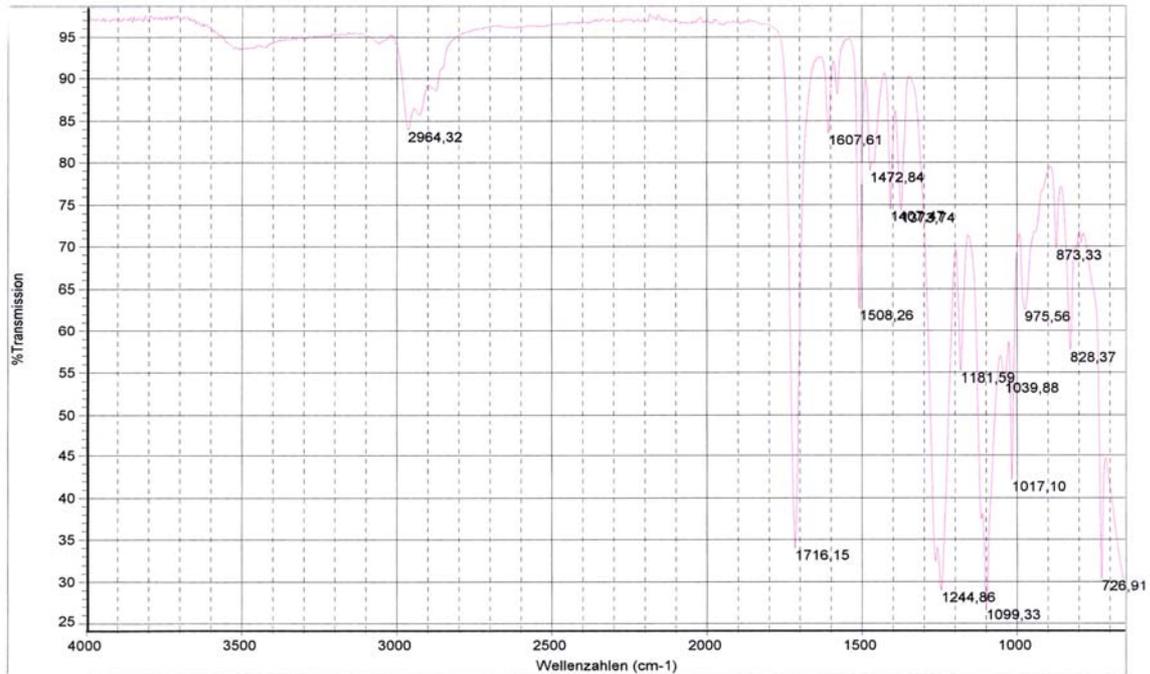


Abbildung 22: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Pulver

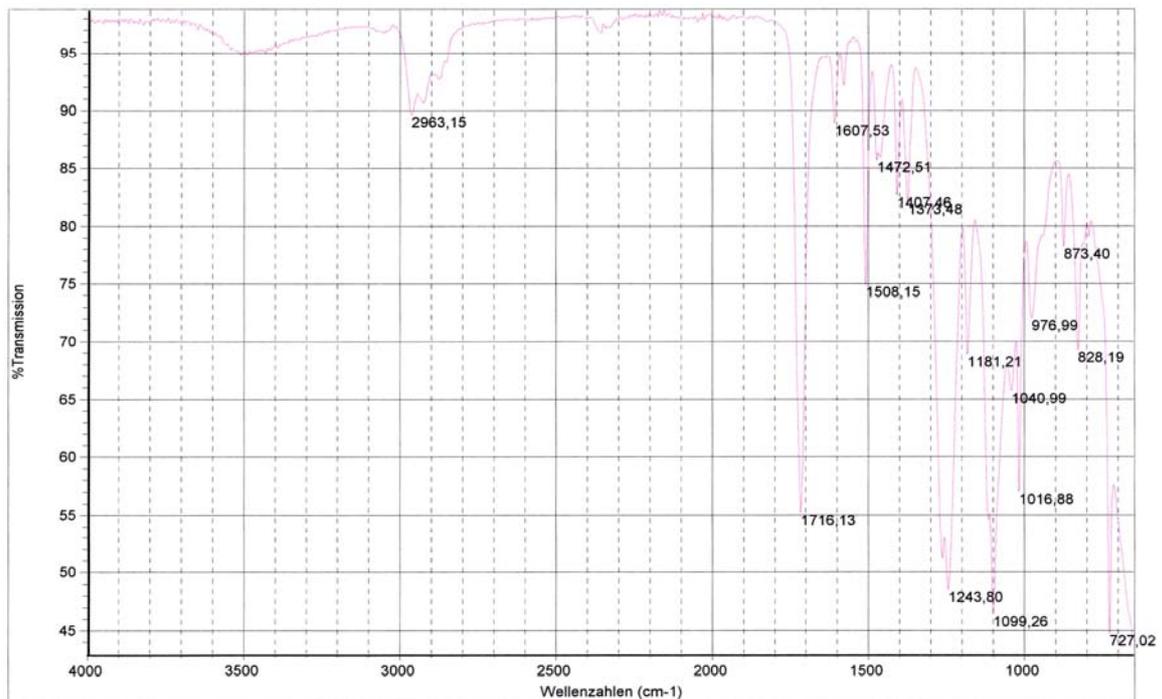


Abbildung 23: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, thermisch ausgehärtet

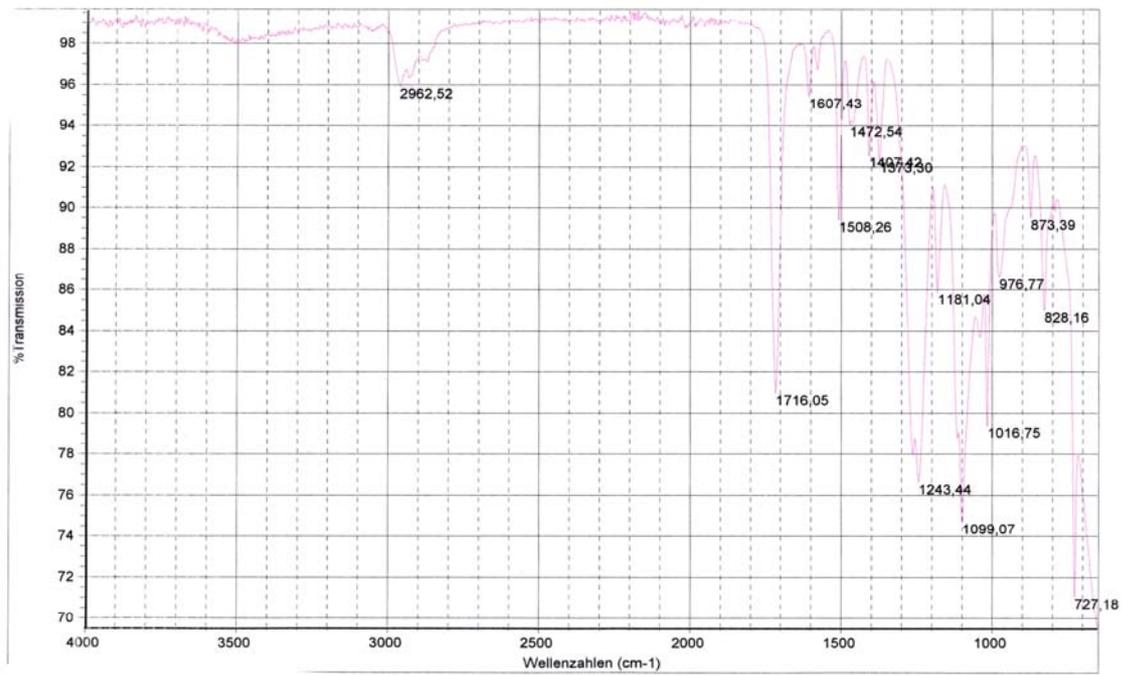


Abbildung 24: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Superburn Emitter 100%

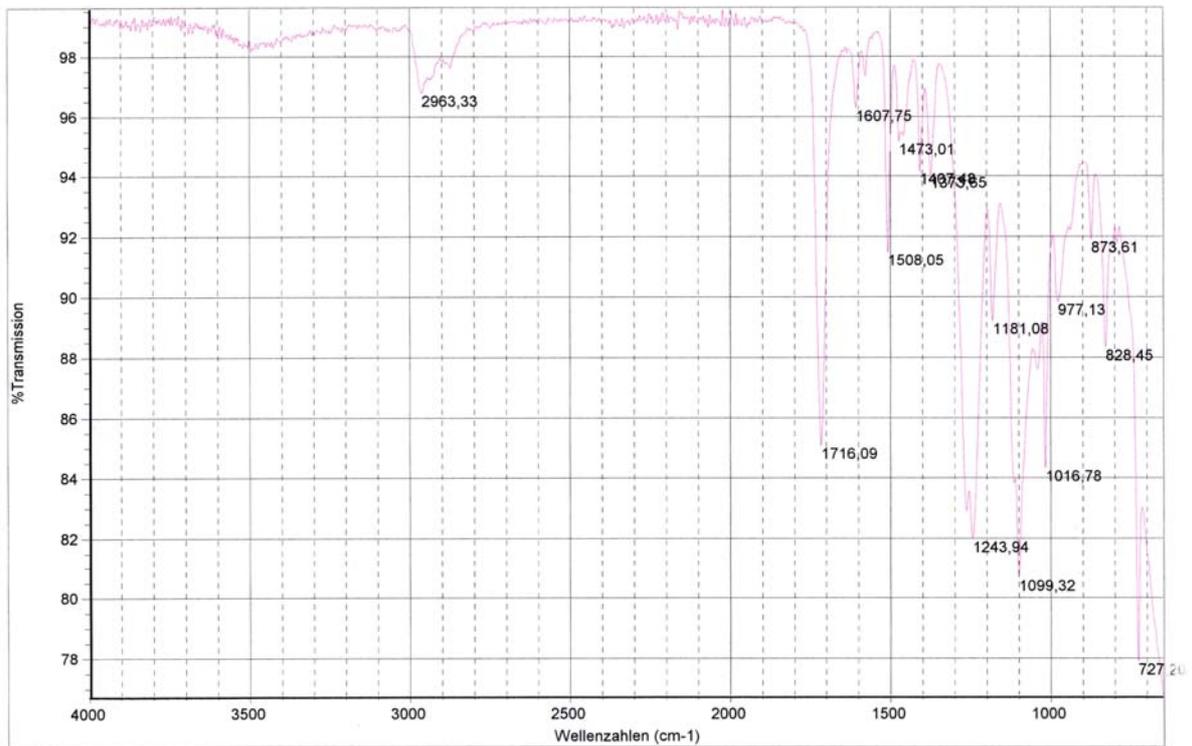


Abbildung 25: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Superburn Emitter 50%

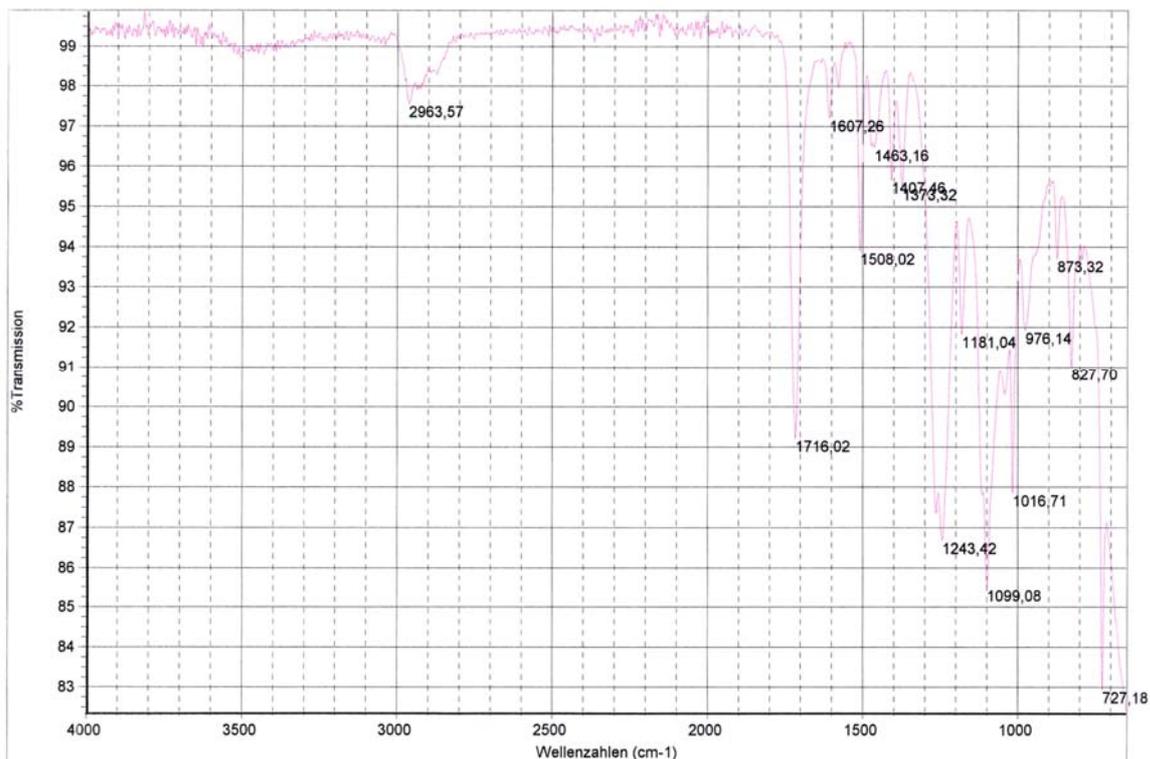


Abbildung 26: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Highburn Emitter 100%

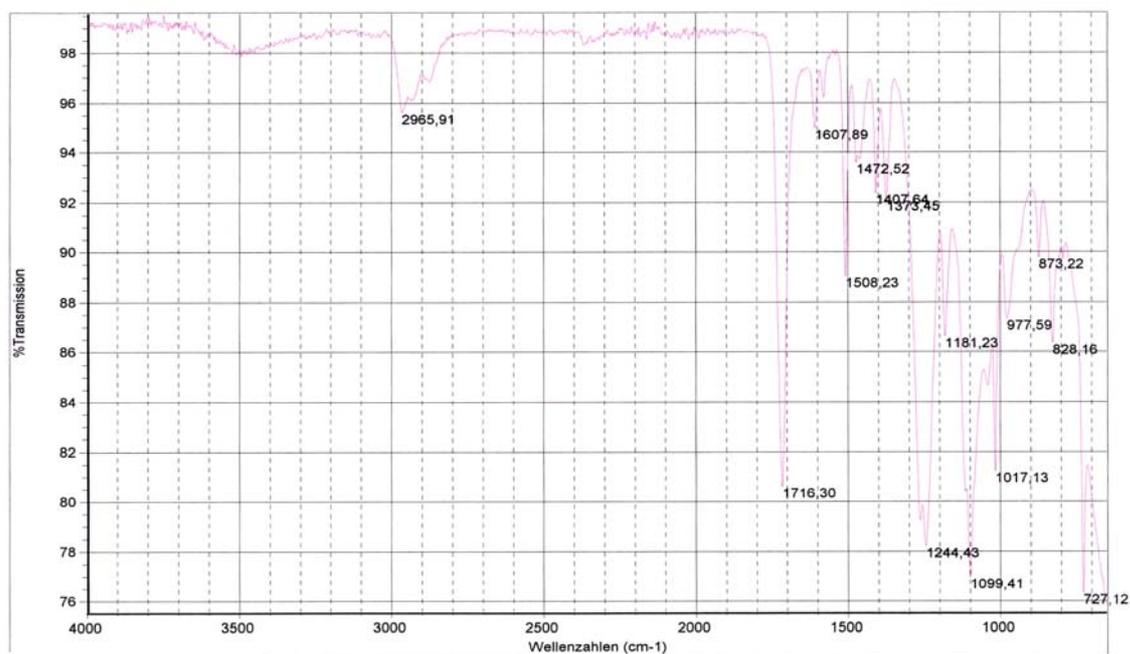


Abbildung 27: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Highburn Emitter 50%

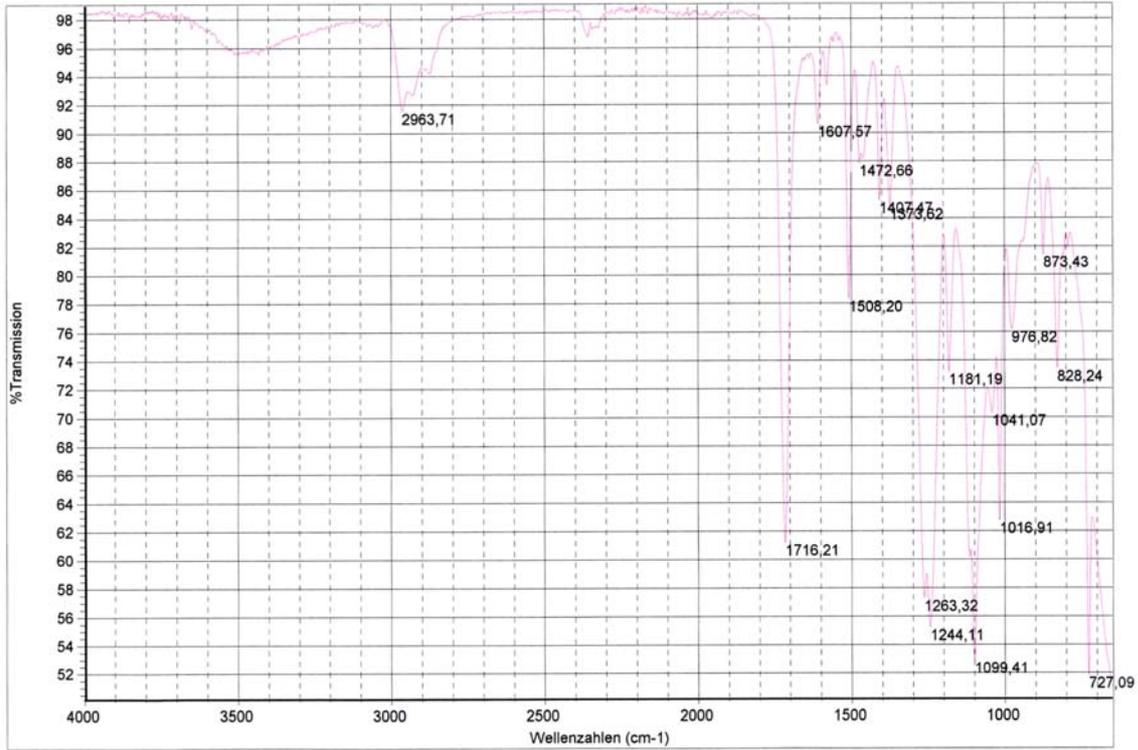


Abbildung 28: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Normalburn Emitter 100%

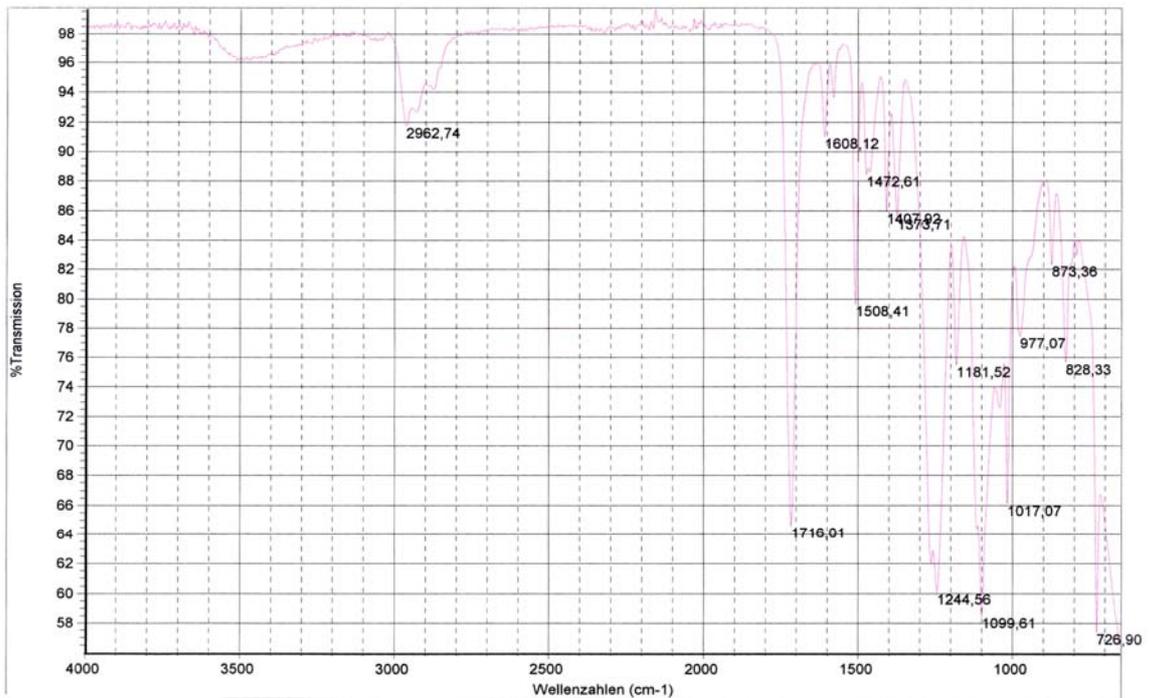


Abbildung 29: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Normalburn Emitter 50%

In der zweiten Vergleichsreihe wurde ein Pulverlack auf Epoxy-Basis, der Pulverlack „NIR1-9270“, der bei unterschiedlichen Aushärtungsparametern vernetzt wurde, IR-spektroskopisch untersucht (siehe Abbildung 30 bis Abbildung 35).

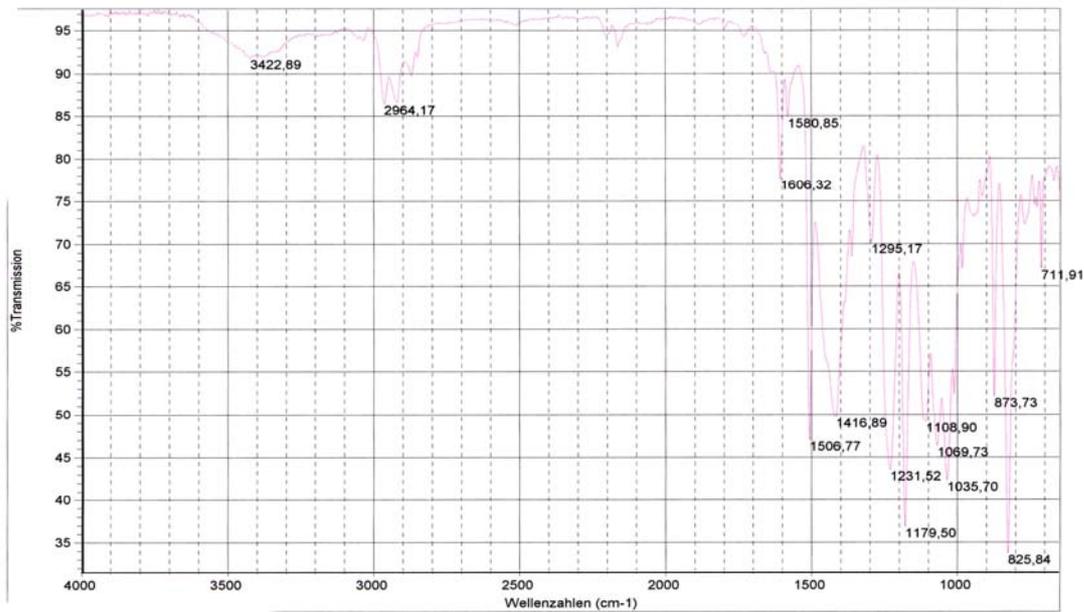


Abbildung 30: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, Pulver

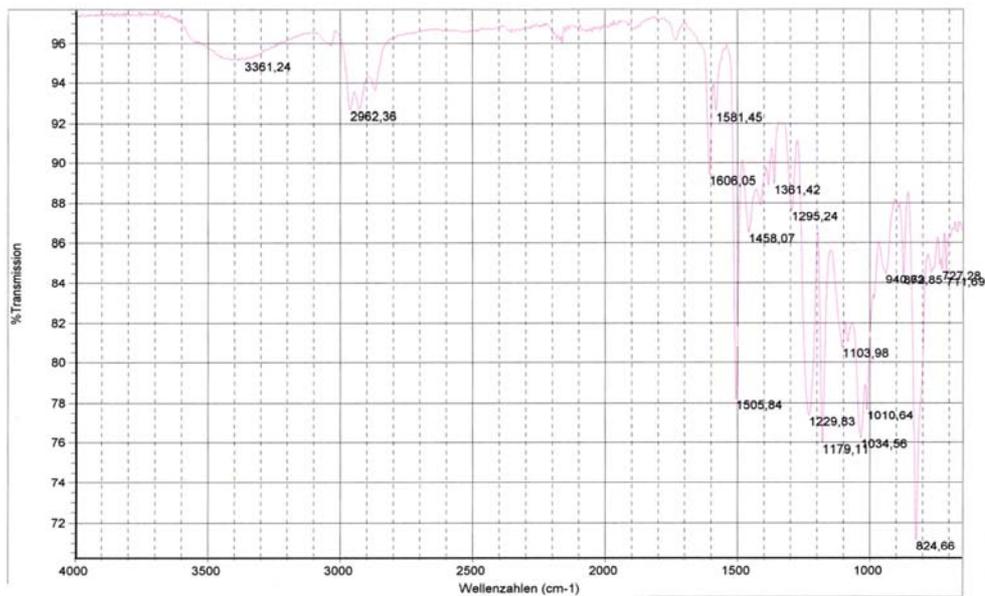


Abbildung 31: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, thermisch ausgehärtet

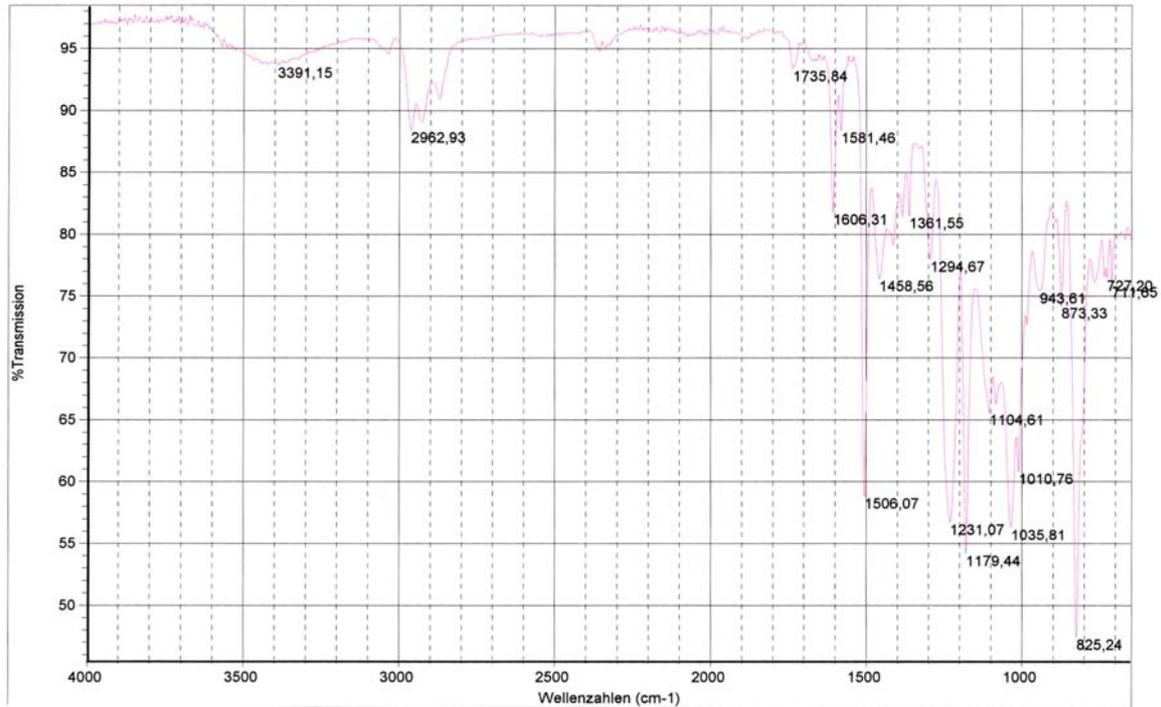


Abbildung 32: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, Highburn Emittor 100%

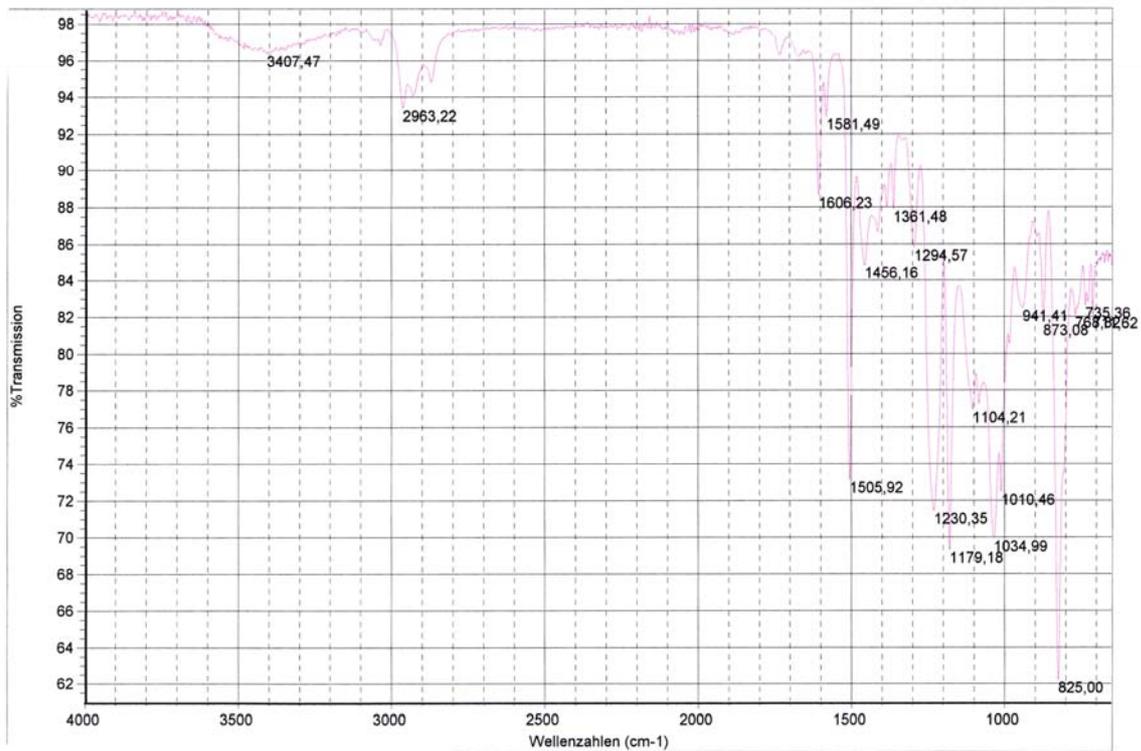


Abbildung 33: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, Highburn Emittor 50%

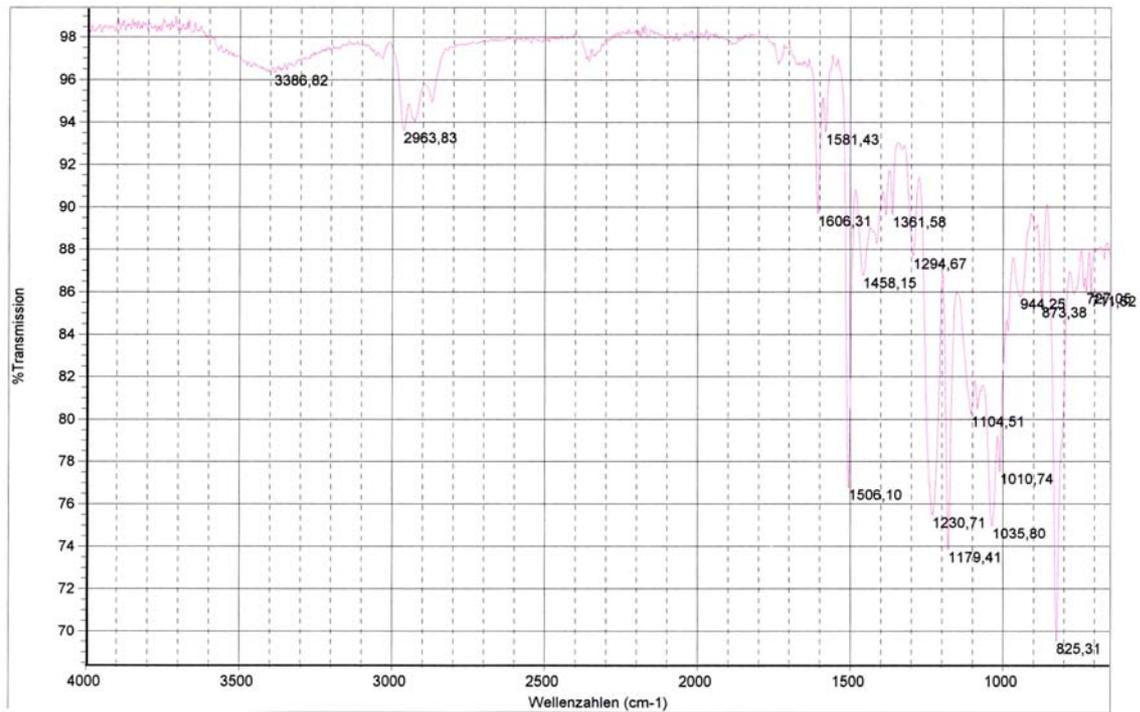


Abbildung 34: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, Normalburn Emitter 100%

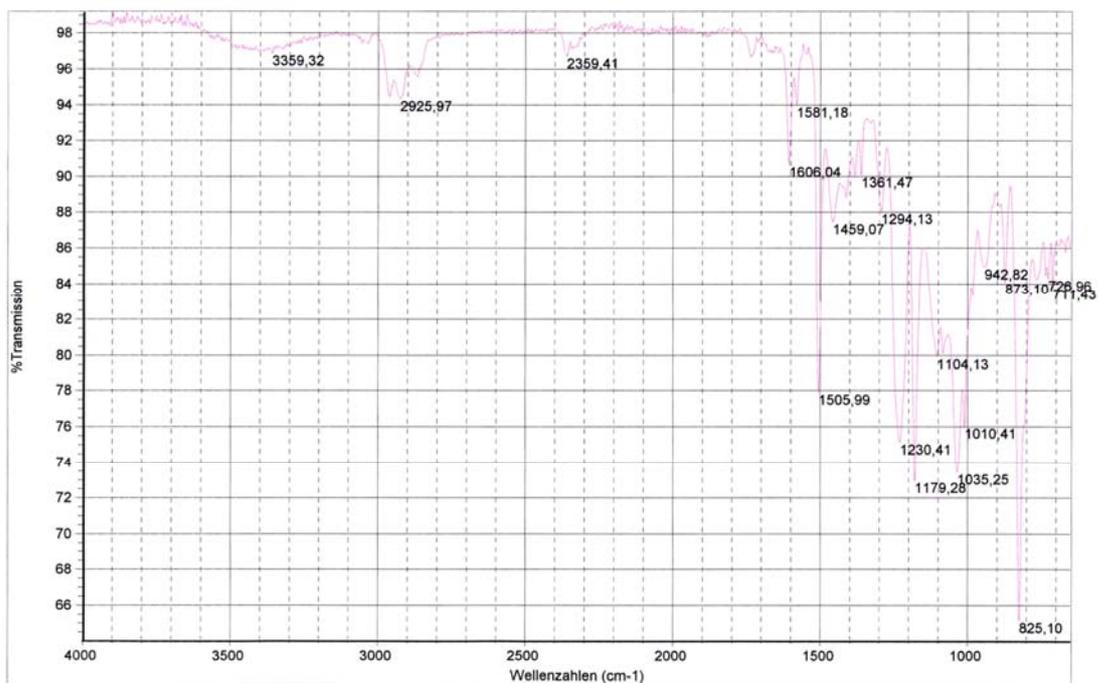


Abbildung 35: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, Normalburn Emitter 50%

Im Prinzip gilt das Gleiche wie für den Pulverlack NIR3-1113, nämlich die aufgezzeichneten Spektren ähneln einander sehr stark. Zwar sind die Signale unterschiedlich

intensiv, aber die Positionen der Peaks stimmen gut überein. Eine Ausnahme ist der Bereich um  $1400\text{ cm}^{-1}$ : die Bande ist im Spektrum des nicht zur Reaktion gebrachten Pulvers sehr viel intensiver und breiter als die Spektren, der mittels verschiedener Parameter ausgehärteten Lacke. Diese Bande ist der Bereich der C-O-Valenzschwingung oder der O-H-Deformationsschwingung in Carbonsäuren [53]. Die Verringerung dieses Signals kann auf das Abreagieren der Carbonsäure zurückgeführt werden.

Gemäß den in dieser Arbeit erhaltenen IR-Spektren darf damit als ausgeschlossen gelten, dass sich durch den Einsatz von NIR-Strahlen zur Aushärtung des Pulverlacks NIR1-9270 signifikante Unterschiede in der Lack-Struktur ergeben.

## 4 Experimenteller Teil

### 4.1 Verwendete Substanzen

Beschleuniger B

Beschleuniger D

Beschleuniger A

Beschleuniger C

Gesättigtes, carboxyliertes Polyester Harz

Uralac P5263 der Firma DSM Resins bv (AP Zwolle (Holland))

Festes Epoxidharz

Araldite GT 7004 ES der Firma Vantico GmbH & Co KG (Bergkamen (Deutschland))

Verlauf- und Oberflächenkontrollmittel

Resiflow PV 88 der Firma Worlée-Chemie GmbH (Lauenburg (Deutschland))

Titandioxid

TI-PURE<sup>®</sup> R706-11 RUTILE der Firma Du Pont de Nemours international (Antwerpen (Belgien))

Aluminium-Bleche

Aluminium-Bleche, mit Chromat vorbehandelt von Q-Panel Lab products in Cleveland (Ohio), USA mit den Ausmaßen 0,6mm\*76mm\*152mm

Epoxy-Pulverlack RAY-TEC<sup>®</sup> NIR<sup>®</sup> :

RAY-TEC<sup>®</sup> NIR<sup>®</sup> NIR1-9270 der Firma DuPont Pulverlack Deutschland GmbH & Co. KG (Essenbach-Altheim (Deutschland))

Hybrid-Pulverlack RAY-TEC<sup>®</sup> NIR<sup>®</sup> :

RAY-TEC<sup>®</sup> NIR<sup>®</sup> NIR3-1113 der Firma DuPont Pulverlack Deutschland GmbH & Co. KG  
(Essenbach-Altheim (Deutschland))

Klarlack

Teflon Clear Coat der Firma Kansai Paint Ltd. (Japan)

## **4.2 Verwendete Geräte**

Waage

Waage des Typs I4800P der Firma Sartorius AG. (Göttingen (Deutschland))

Mischer

Mischer des Typs TLHK 8, Baujahr: 1971, Motorleistung: 1,8/2,2 kW, der Firma Günther Papenmeier K.G. (Detmold-Pivitsheide (Deutschland))

Extruder

Einschnecken-Extruder des Typs Ko-Kneter PLK 46 B der Firma Buss-AG (Basel(Schweiz))

Kaffeemühlen

Kaffeemühlen „KRUPS KM 75“ Typ 203 C der Firma Robert KRUPS GmbH & Co. KG (Solingen (Deutschland))

Siebe

Analysensiebe, Nennmaschenweite: 0,16 mm ( Siebrahmen aus Messing, Siebboden aus Edelstahl) der Firma Haver & Boecker (Oelde (Deutschland))

### NIR-Strahlungsgerät

NIR-Testing Facility mit Wolframhalogenquarzlampen der Fa. Radium Lampenwerk,  
Typ: Technikumsanlage der Firma Advanced Photonics Technologie (adphos) AG  
(Bruckmühl-Heufeld (Deutschland))

<u>Emitter-Typ</u>	<u>Leistung je Emitter bei 400 Volt-Anschluss in [W]</u>	<u>Länge der Wendel [mm]</u>	<u>Querschnitt der Wendel [nm]</u>	<u>Oberfläche [m<sup>2</sup>]</u>
Normal-burn	1000	254	0,8	$6,38 \cdot 10^{-4}$
Highburn	2200	254	1,6	$1,28 \cdot 10^{-3}$
Superburn	4400	254	3,2	$2,55 \cdot 10^{-3}$

**Tabelle 9: Emitter-Typen**<sup>[27]</sup>

### Gelzeit-Meßgerät:

Geltest-Gerät der Firma Coesfeld GmbH&CoKG (Dortmund(Deutschland))

### DSC-Gerät:

Mettler Toledo STAR<sup>e</sup> Thermoanalysen-System DSC 821<sup>e</sup> (einschließlich der Software STAR<sup>e</sup> SW V6.0) der Firma Mettler Toledo GmbH (Gießen (Deutschland))

### Waage (Einwaage der DSC-Proben)

Fein-Waage des Typs AG 245 der Firma Mettler Toledo GmbH (Gießen (Deutschland))

### DMA-Gerät

DMA7 der Firma Perkin Elmer

### Infrarot-Spektrometer

AVATAR 360 FT-IR der Firma Nicolet

### 4.3 Synthese der beschleunigten NIR-aushärtbaren Pulverlacke

Es wurden die jeweiligen Ausgangssubstanzen eingewogen und auf einem Mischer vorgemischt. Anschließend wurden die Vormischungen auf einem Extruder dispergiert. Die beim Extrudieren entstehenden Pulverlack-Chips wurden mit einer Kaffeemühle vermahlen und über ein Sieb abgeseibt. Das Unterkorn wurde mittels einer Corona-Handsprühpistole auf ein Blech appliziert.

Alle Proben zur Bestimmung der NIR-Mindestbestrahlzeit wurden mit 5 cm Abstand Emitter-Blechoberfläche und mit 24 Normalburn-Emittern bei 100% Leistung, dh. mit 24000 W, auf Aluminium-Blechen eingebrannt. In der 5. Spalte der Tabelle 10 sind die ermittelten Mindestbestrahlzeiten ablesbar. In der 5. Spalte der Tabelle 11 ist die Bestrahlungszeit ersichtlich, die gerade noch nicht zur Aushärtung gereicht hat.

<u>Proben- Bezeichnung</u>	<u>Beschleuniger</u>	<u>Stoffmenge Be- schleuniger [mol]</u>	<u>Geschwindigkeit [mm/s] des lackierten Blechs</u>	<u>Aushärtungs- zeit [s]<sup>7</sup></u>
F58- 2	Beschleuniger A	0,0005	20	12,5
F58- 3	Beschleuniger A	0,001	22	11,4
F58- 4	Beschleuniger A	0,0025	23	10,9
F58- 5	Beschleuniger B	0,0005	25	10
F58- 6	Beschleuniger B	0,001	27	9,3
F58- 7	Beschleuniger B	0,0025	29	8,6
F58- 8	Beschleuniger C	0,0005	21	11,9
F58- 9	Beschleuniger C	0,001	24	10,4
F58- 10	Beschleuniger C	0,0025	26	9,6
F58- 11	Beschleuniger D	0,0005	22	11,4
F58- 12	Beschleuniger D	0,001	25	10
F58- 13	Beschleuniger D	0,0025	27	9,3

**Tabelle 10: Ermittlung der Mindestbestrahlzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern (ausgehärtet)**

<u>Proben- Bezeich- nung</u>	<u>Beschleuniger</u>	<u>Stoffmenge Be- schleuniger [mol]</u>	<u>Geschwindigkeit [mm/s] des lackierten Blechs</u>	<u>Aushärtungs- zeit [s]<sup>8</sup></u>
F58- 2	Beschleuniger A	0,0005	21	11,9
F58- 3	Beschleuniger A	0,001	23	10,9
F58- 4	Beschleuniger A	0,0025	24	10,4
F58- 5	Beschleuniger B	0,0005	26	9,6

<sup>7</sup> Die Aushärtungszeit t berechnet sich aus:  $t = \text{Bestrahlungslänge} / \text{Geschwindigkeit}$ , die Bestrahlungslänge entspricht der Emitterlänge von 250 mm  $\Rightarrow t = 250 \text{ mm} / \text{Geschwindigkeit [mm/s]}$

<sup>8</sup> Die Aushärtungszeit t berechnet sich aus:  $t = \text{Bestrahlungslänge} / \text{Geschwindigkeit}$ , die Bestrahlungslänge entspricht der Emitterlänge von 250 mm  $\Rightarrow t = 250 \text{ mm} / \text{Geschwindigkeit [mm/s]}$

<u>Proben- Bezeich- nung</u>	<u>Beschleuniger</u>	<u>Stoffmenge Be- schleuniger [mol]</u>	<u>Geschwindigkeit [mm/s] des lackierten Blechs</u>	<u>Aushärtungs- zeit [s]<sup>8</sup></u>
F58- 6	Beschleuniger B	0,001	28	8,9
F58- 7	Beschleuniger B	0,0025	30	8,3
F58- 8	Beschleuniger C	0,0005	22	11,4
F58- 9	Beschleuniger C	0,001	25	10
F58- 10	Beschleuniger C	0,0025	27	9,3
F58- 11	Beschleuniger D	0,0005	23	10,9
F58- 12	Beschleuniger D	0,001	26	9,6
F58- 13	Beschleuniger D	0,0025	28	8,9

**Tabelle 11: Ermittlung der Mindestbetrahlzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern (gerade noch nicht ausgehärtet)**

#### **4.4 Herstellung der Proben für die vergleichenden Untersuchungen von unterschiedlichen Aushärtungsmethoden an unterschiedlichen NIR-härtbaren Pulverlacken**

##### *4.4.1 Aushärtung mittels NIR-Strahlung*

Das zu bestrahlende, beschichtete Blech (1, siehe Abbildung 36) wurde auf einem Transportschlitten (2, siehe Abbildung 36) horizontal unter den Strahlern (3, siehe Abbildung 36) durchgefahren. An der Steuerungseinheit der NIR-Anlage kann der Leistungsgrad der Strahler in % sowie die Geschwindigkeit des Transportschlittens, und damit die Geschwindigkeit der Probe, eingestellt werden. Die Bestrahlungszeit oder Aushärtungszeit  $t$  ist damit gleich der Verweilzeit der Probe unter den Strahlern und berechnet sich zu:  $t = \text{Bestrahlungslänge} / \text{Geschwindigkeit}$ , die Bestrahlungslänge entspricht der Emitterlänge von ca. 250 mm  $\Rightarrow t = 250 \text{ mm} / \text{Geschwindigkeit [mm/s]}$ .



Legende: 1= das zu bestrahlende, beschichtete Blech  
2=Transportschlitten  
3=Strahler

**Abbildung 36: Ansicht der Strahlungseinheit der verwendeten NIR-Anlage**

#### *4.4.2 Herstellung der DSC-Proben*

Zur Herstellung der strahlungsgehärteten DSC-Proben wurden ein weißer NIR-Hybrid-Pulverlack und ein schwarzer Epoxy-NIR- Pulverlack mit verschiedenen NIR-Emitter-Typen und verschiedenen Leistungs-Einstellungen der Emitter eingebrannt. Der Abstand Emitter-Blechoberfläche betrug immer 5 cm.

Für den weißen Hybrid-Pulverlack RAY-TEC<sup>®</sup> NIR<sup>®</sup> NIR3-1113 wurden die folgenden Einbrennparameter verwendet:

Probenbezeichnung	Abstand Emitter-Blech-oberfläche in [cm]	Emit-ter-Typ	Leis-tung in %	Gesamt-Leistung in [W]	Geschwindigkeit [mm/s] des lackier-ten Blechs	Aushärtungs-zeit [s] <sup>9</sup>
NIR3-1113,NB,100%	5	NB	100	24000	30	8,3
NIR3-1113,NB,50%	5	NB	50	12000	15	16,6
NIR3-1113,HB,100%	5	HB	100	52800	60	4,2
NIR3-1113,HB,50%	5	HB	50	26400	30	8,3
NIR3-1113,SB,100%	5	SB	100	105600	120	2,1
NIR3-1113,SB,50%	5	SB	50	52800	60	4,2

**Tabelle 12: Einbrennparameter des NIR-Pulverlacks RAY-TEC® NIR® NIR3-1113 mittels NIR-Strahlung**

Der schwarzen Epoxy-Pulverlack RAY-TEC® NIR® NIR1-9270 wurden mit den folgenden Parametern eingebrannt:

Probenbezeichnung	Abstand Emitter-Blechoberfläche in [cm]	Emit-ter-Typ	Leis-tung in %	Gesamt-Leistung in [W]	Geschwindigkeit [mm/s] des lackier-ten Blechs	Aushärtungs-zeit [s] <sup>10</sup>
NIR1-9270,NB,100%	5	NB	100	24000	70	3,6
NIR1-9270,NB,50%	5	NB	50	12000	35	7,1
NIR1-9270,HB,100%	5	HB	100	52800	150	1,7
NIR1-9270,HB,50%	5	HB	50	26400	80	3,1

**Tabelle 13: Einbrennparameter des NIR-Pulverlacks RAY-TEC® NIR® NIR1-9270 mittels NIR-Strahlung**

Zur Vermessung der thermischen Proben wurde das jeweilige Pulver im DSC-Ofen ausgehärtet und anschließend in einem 2. Durchlauf vermessen.

#### 4.4.2 Herstellung der DMA-Proben

Für die Herstellung der DMA-Proben musste ein freier Film des jeweiligen zu untersuchenden Lacks gebildet werden. Um einen freien Film zu erhalten, befand sich unter der Pulverlack-Schicht eine Klarlack-Schicht. Im Gegensatz, zur Aluminium-

<sup>9</sup> Die Aushärtungszeit  $t$  berechnet sich aus:  $t = \text{Bestrahlungslänge} / \text{Geschwindigkeit}$ , die Bestrahlungslänge entspricht der Emitterlänge von 250 mm  $\Rightarrow t = 250 \text{ mm} / \text{Geschwindigkeit} [\text{mm/s}]$

<sup>10</sup> Die Aushärtungszeit  $t$  berechnet sich aus:  $t = \text{Bestrahlungslänge} / \text{Geschwindigkeit}$ , die Bestrahlungslänge entspricht der Emitterlänge von 250 mm  $\Rightarrow t = 250 \text{ mm} / \text{Geschwindigkeit} [\text{mm/s}]$

Oberfläche auf der die Pulverlackschicht sehr gut haftet, lässt sich die Pulverlack-Schicht von der Klarlack-Schicht als Film abziehen, da keine Haftung zwischen den beiden Schichten vorliegt.

Der Klarlack wurde mit einem Pinsel auf einer Seite eines Aluminium-Blechtes aufgetragen und 20 min bei 200°C thermisch eingebrannt.

Nach dem Erkalten wurde der jeweilige zu untersuchende Pulverlack mittels Corona-Pistole auf den Klarlack aufgetragen und thermisch bzw. mittels NIR-Strahlung eingebrannt.

Für die Herstellung der strahlungsgehärteten IR-Proben betrug der Abstand Emitter-Blechoberfläche immer 5 cm.

Für den weißen Hybrid-Pulverlack NIR3-1113 wurden die folgenden Einbrennparameter verwendet:

Probenbezeichnung	Emitter-Typ	Leistung in %	Gesamt-Leistung in [W]	Geschwindigkeit [mm/s] des lackierten Blechs	Aushärtungszeit [s]
NIR3-1113,NB(100%)	NB	100	24000	30	8,3

**Tabelle 14: Einbrennparameter des NIR-Pulverlacks RAY-TEC® NIR® NIR3-1113**

Thermisch wurde der Pulverlack NIR3-1113 bei 200°C 22 min im Umluftofen eingebrannt

Für den schwarzen Epoxy- Pulverlack NIR1-9270 kamen die folgenden Einbrennparameter zur Anwendung:

Probenbezeichnung	Emitter-Typ	Leistung in %	Gesamt-Leistung in [W]	Geschwindigkeit [mm/s] des lackierten Blechs	Aushärtungszeit [s]
NIR1-9270,HB(100%)	HB	100	52800	150	1,7

**Tabelle 15: Einbrennparameter des NIR-Pulverlacks RAY-TEC® NIR® NIR1-9270 mittels NIR-Strahlung**

Thermisch wurde der Pulverlack NIR1-9270 bei 140°C 12 min im Umluftofen eingebrannt

## 4.5 Untersuchungsmethoden

### 4.5.1 Gelzeitmessungen

Zur Bestimmung der Gelzeit wurden 200 mg des zu messenden Pulvers auf einem in der Mitte leicht geknickten Aluminium-Blech eingewogen und anschließend in die auf 185°C bzw. 215° aufgeheizte Mulde des Gelzeitmeßgeräts gegeben. Durch das kontinuierliche manuelle Rühren und Herausziehen des zum Gerät dazugehörigen Metallstäbchens wurde die Gelzeit bestimmt. Das Ende der Gelzeit war erreicht, sobald sich ein zäher, abreißender Faden am Stäbchen gebildet hatte.

### 4.5.2 DSC-Messungen

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete DSC-Gerät basiert auf dem Boersma-Prinzip. Um reproduzierbare Temperatur- und Enthalpiewerte zu erhalten, erfolgt eine Kalibrierung des DSC-Gerätes mit Standardsubstanzen [48].

Das DSC-Gerät wurde mittels einer Zweipunktkalibrierung, und zwar mit den Standardsubstanzen, Indium und Zink kalibriert. Die bei verschiedenen Aufheizraten jeweils gemessenen Schmelztemperaturen des Indiums bzw. des Zinks wird mit dem tabellierten Werten korrigiert. In gleicher Weise wird mittels der tabellierten Schmelzenthalpie-Werte eine Enthalpie-Kalibrierung vorgenommen.

Für die DSC-Analysen wurde die jeweilige zu untersuchende Substanzmenge (5-35 mg) in einen Aluminium-Tiegel eingewogen. Ein Aluminium-Tiegeldeckel wurde mittels einer Nadel perforiert und anschließend zum Verschließen des Aluminium-Tiegels verwendet. Durch das Perforieren soll eine Beeinflussung der Basislinie, z.B. aufgrund eines erhöhten Innendruckes, der durch das Freisetzen leicht flüchtiger Substanzen verursacht wird, verhindert werden.

Das verwendete DSC-Programm 1 bestand aus drei Durchläufen. Beim ersten Durchlauf wurde auf 80°C erwärmt, um Verunreinigungen zu entfernen (Segment 1). Nach dem ersten Durchlauf wurde auf – 20°C abgekühlt (Segment 2).

Das Ziel des zweiten Durchlaufs war es, die Substanz deutlich über diejenige Temperatur hinaus aufzuheizen, bei der keine Reaktion mehr auftritt (Segment 3). Danach wurde auf 0°C abgekühlt (Segment 4) und für 5 Minuten die Temperatur von 0°C gehalten (Segment 5).

Im dritten Durchlauf wurde dann die Glasübergangstemperatur bestimmt (Segment 6).

<b><u>Segment 1</u></b>	
Start-Temperatur [°C]	-10
End-Temperatur [°C]	80
Heizrate [°C/min]	10
<b><u>Segment 2</u></b>	
Start-Temperatur [°C]	80
End-Temperatur [°C]	-20
Heizrate [°C/min]	-20
<b><u>Segment 3</u></b>	
Start-Temperatur [°C]	-20
End-Temperatur [°C]	260
Heizrate [°C/min]	10
<b><u>Segment 4</u></b>	
Start-Temperatur [°C]	260
End-Temperatur [°C]	0
Heizrate [°C/min]	-20
<b><u>Segment 5</u></b>	
Temperatur [°C]	0
Dauer [min]	5
<b><u>Segment 6</u></b>	
Start-Temperatur [°C]	0
End-Temperatur [°C]	260
Heizrate [°C/min]	10

**Tabelle 16: DSC- Programm 1**

Das verwendete DSC-Programm 2 bestand aus zwei Durchläufen. Beim ersten Durchlauf wurde auf 80°C erwärmt, um Verunreinigungen zu entfernen (Segment 1). Nach dem ersten Durchlauf wurde auf – 20°C abgekühlt (Segment 2). Im zweiten Durchlauf wurde dann die Glasübergangstemperatur bestimmt (Segment 3).



Um die NIR-Mindestbestrahlzeiten der Lacke mit unterschiedlichen Phosphonium-Beschleunigern zu bestimmen, wurden die Lacke mittels DSC vermessen. Ein Lack wurde als ausgehärtet angesehen, wenn sich eine Glasübergangstemperatur von 76°C oder größer und keine feststellbare Reaktionsenthalpie ergab. Die Lacke wurden mit dem DSC-Programm 2 vermessen.

Die Glasübergangstemperatur bei thermischer Aushärtung wurde durch DSC-Messung des entsprechenden Pulvers mittels DSC-Programm 1 ermittelt, die jeweilige Glasübergangstemperatur ergab sich beim 2. Durchlauf.

Für die Bestimmung der Glasübergangstemperatur der strahlengehärteten Lacke wurde das DSC-Programm 2 verwendet.

#### *4.5.3 DMA-Messungen*

Um freie Pulverlackfilme zu erhalten, wurde die jeweilige Lackprobe streifenförmig von der Klarlackschicht mittels eines Messers abgelöst und an beiden Enden der DMA-Messeinrichtung eingespannt. Danach wurde die Probe kontinuierlich zu erzwungenen Schwingungen mit konstanter Frequenz von 1 Hz angeregt und ihre resultierende Deformation über einen weiten Temperaturbereich gemessen. Die Messungen wurden mit einer Aufheizrate von 10 K/min durchgeführt.

Unter der Wirkung einer sinusförmigen Kraft ist die Deformationsamplitude viskoelastischer Werkstoffe um einen Phasenwinkel  $\Delta$  gegenüber der Kraftamplitude verschoben. Aus diesem funktionalen Zusammenhang zwischen Kraft und Deformation lassen sich der Speichermodul  $E'$  und der Verlustmodul  $E''$  bestimmen. Sind die Amplituden von Kraft und Deformation im Geltungsbereich der Theorie des linear viskoelastischen Verhaltens, so sind  $E'$  und  $E''$  von den aufgebrachten Kräften und Deformationen unabhängig. Der Geltungsbereich für Verformungsamplituden unterhalb des Glasübergangs liegt zum Teil weit unterhalb 1 % und oberhalb des Glasübergangs

bei einigen Prozent. Der Speichermodul oberhalb  $T_g$  ist proportional zur Vernetzungsdichte. Der  $\tan\delta$  ist das Verhältnis von  $E''/E'$ .

#### *4.5.4 Infrarot-spektroskopische Untersuchungen*

Vor der eigentlichen Messung wurde der Hintergrund vermessen. Anschließend wurde die entsprechende Probe auf ihrem Aluminium-Blech IR-spektroskopisch vermessen.

## **Teil 2: Erfolgsfaktoren einer Verfahrensinnovation**

### **5 Erkenntnisse der bisherigen Neuproduktentwicklungs-Forschung**

In diesem Kapitel sollen die für diese Arbeit relevanten Erkenntnisse der bisherigen Neuproduktentwicklungs-Forschung dargelegt werden. Zu diesem Zweck wurden die Erkenntnisse in die folgenden Kategorien eingeordnet:

- 1) Inhalte des Neuproduktentwicklungs-Prozesses
- 2) Organisation der Neuproduktentwicklung
- 3) Innovationskultur, Innovationsgrad und Innovationsmessung
- 4) Einfluss der Unternehmensleitung
- 5) Strategie der Neuproduktentwicklung

#### **5.1 Inhalte des Neuproduktentwicklungs-Prozesses**

Begonnen werden soll mit den Ergebnisse und Erkenntnissen der Studien New Prod I-Projekt, New Prod II- Projekt und New Prod III-Projekt sowie der Studie über Neue Produkte in der Chemischen Industrie zum Thema „Inhalt des Neuproduktentwicklungs-Prozesses“ von Cooper und Kleinschmidt.

Bei dem New Prod I-Projekt wurden 102 erfolgreiche und 93 nicht erfolgreiche Projekte in 103 Unternehmen durch schriftliche Befragung zu 77 Merkmalen untersucht.

Zwei wichtige Erfolgs-Faktoren bezüglich Inhalt des Neuproduktentwicklungs-Prozesses wurden im Rahmen dieses Projektes ermittelt, und zwar

- 1) ein in der Perspektive der Kunden einzigartiges, hervorragendes Produkt mit einem herausragenden Vorteil auf dem Markt, und
- 2) eine starke Markt-Orientierung, basierend auf stabilen Marktkenntnissen, vernünftigen Marktdaten und einer gut durchgeführten Marktforschungs- und Produkt-Einführung.

Im Rahmen des New Prod II-Projektes wurden 203 Projekte (123 Erfolge und 80 Misserfolge) in 125 kanadischen Unternehmen hinsichtlich der vier Erfolgsvariablen

Profitabilität, Return-on-Investment, heimischer und ausländischer Marktanteil bewertet. Die Datensammlung erfolgte mittels schriftlicher Befragung von 40 Merkmalen. Erfolgsfaktoren gemäß des New Prod II-Projektes sind hinsichtlich des Inhaltes des Neuproduktentwicklungs-Prozesses

1. ein anfänglicher Screening-Prozess,
2. ein Testmarkt/eine technische Einschätzung,
3. eine detaillierte Marktstudie/ Marktforschung,
4. Geschäfts- und Finanz-Analysen,
5. eine Produkt-Entwicklung,
6. innerbetriebliche Produkt Tests ,
7. eine formelle Markteinführungs-Phase und
8. ein vollständiger Neuprodukt-Prozess [55][56].

Nach der New Prod III-Studie unterliegt Erfolg den folgenden Schlüsselfaktoren bezüglich des Inhaltes des Neuproduktentwicklungs-Prozesses:

1. ein herausragendes Produkt, welches den Verbrauchern einzigartige Vorteile liefert,
2. ein vor der Entwicklungsphase gut definiertes Produkt,
3. die Qualität der Durchführung der technologischen Aktivitäten,
4. die Qualität der Durchführung der Vorentwicklungs-Aktivitäten,
5. die Qualität der Durchführung der Marketing Aktivitäten sowie
6. die Markt-Attraktivität [55][56].

Bei der internationalen Chemiestudie von Cooper und Kleinschmidt über Neue Produkte in der Chemischen Industrie wurden 103 (68 erfolgreiche und 35 nicht-erfolgreiche) Projekte in insgesamt 21 kanadischen, US-amerikanischen und britischen Unternehmen untersucht. Diese Studie legte, neben schon bekannten Erfolgsfaktoren, auch einige bis dahin unbekannte Erfolgsfaktoren in Bezug auf den Inhalt des Neuproduktentwicklungs-Prozesses offen:

1. Lieferanten-initiierte Neuprodukt- Ideen hatten die höchste Erfolgsrate (86%),

2. die Phase des Produktlebenszyklus auf dem Markt des neuen Produktes beeinflusst den zukünftigen Erfolg oder Misserfolg. Produkte, die auf Markt- oder Produkt-Kategorien in der Einführungsphase des Produktlebenszyklus abzielen, führen zu höheren Fehlschlägen (58%). Im Vergleich dazu sind neue Produkte in der frühen Wachstums-Phase zu 81 % erfolgreich
3. die relative Produktqualität, herausragend im Vergleich zu den Wettbewerbsprodukten hinsichtlich der Kundenbedürfnisse sowie ein ausgezeichnetes Preis-/Leistungs-Verhältnis, hat einen positiven Einfluss. Im Gegensatz dazu sind unterschiedliche Nicht-Produkt-Elemente, wie z.B. der Markenname oder das Firmen-Image nur von geringer Bedeutung für die finanzielle Performance des neuen Produktes [55][56].

Bei einer vierjährigen Studie in der Elektronik-Industrie wurden von Zirger und Maidique 330 Neu-Produkte untersucht. Folgende Schlüsselfaktoren, die den Inhalt des Neuproduktentwicklungs-Prozesses betreffen, gehen aus dieser Studie hervor:

1. Neue Produkte müssen einen bedeutsamen Wert für den Kunden liefern. Dieser Wert kann z.B. in einer herausragenden technischen Performance bestehen.
2. Firmen sollten Projekte wählen, die auf in der Firma existierende technologischen, Marketing- und organisatorischen Kompetenzen beruhen [57][56].

Im Grundsatz zeigen die Erkenntnisse und Ergebnisse bisheriger Neuproduktentwicklungs-Forschungsarbeiten, wie z.B. die Studien von Song/Parry (1996) und von Griffin (1997), dass das Vorhandensein eines formalen Prozesses, der komplett ist und durch Professionalität charakterisiert ist, positiven Einfluss auf den Erfolg neuer Produkte hat [58][59][56]. Weitere wichtige Faktoren für den Erfolg neuer Produkte sind [56]

1. die Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase: die Planung vor Eintritt in die Entwicklungsphase sollte insbesondere die erste grobe Bewertung von Ideen, die Durchführung technischer und marktbezogener Machbarkeitsstudien eine kommerzielle Bewertung des Projektes umfassen. Außerdem sollte das Produktkonzept, der Zielmarkt und der relative Nutzenzugewinn deutlich und klar beschrieben werden. Diese Erkenntnisse gewannen z.B. Barczak

(1995), Mishra/Kim/Lee (1996) und Calantone/Schmidt/Di Benetto (1997) im Laufe ihrer Arbeiten [60][61][62][56].

2. die kommerzielle Bewertung des Projektes im Projekt-Verlauf. Dieser Befund resultiert z.B. aus den Studien von Song/Parry (1996) [58].
3. die Prozess-Orientierung an den Anforderungen des Marktes. Bezüglich der Orientierung des Neuproduktentwicklungs-Prozesses an den Anforderungen des Marktes führte z.B. Atuahene-Gima Studien durch [63]. Die Prozess-Orientierung an den Anforderungen des Marktes betrifft z. B. die Marktforschungs-Qualität hinsichtlich der Erfassung und Beurteilung von Kundenwünschen [61] und die Beobachtung des Wettbewerbs [62][61]

Eine Erkenntnis der Untersuchungen von Song und Parry ist, dass die Qualität der Vorentwicklungsphase darüber entscheidet, ob ein Projekt erfolgreich wird oder nicht [58].

Gemäß Barczak sind die Ideen-Generierung und die Selektionsbemühungen notwendig für einen Erfolg. Die Team-Mitglieder des Projekt-Teams sollten aus verschiedenen funktionalen Bereichen stammen und sowohl über geeignete Fähigkeiten verfügen als auch engagiert sein [60].

Gruner und Homburg führten eine empirische Studie zum Thema „Innovationserfolg durch Kundeneinbindung“ durch. Wichtige Erkenntnisse dieser Studie sind erstens, dass nur eine fokussierte Kundeneinbindung, die in den ersten und den letzten Phasen des Innovationsprozesses intensiv ist, erfolgsversprechend ist, und dass zweitens die Form die Kundeneinbindung (Gruppenarbeitsform, Beraterform oder Teammitglieder) eine eher untergeordnete Rolle für den Erfolg spielt. Des Weiteren ist eine selektive Vorgehensweise bei der Wahl der Kooperationspartner erfolgsentscheidend [64].

Die in den vorherigen Seiten aufgeführten bisherigen wichtigen Erkenntnisse zum Inhalt der Neuproduktentwicklung werden in Tabelle 18 [56] noch einmal im Überblick gezeigt.

Autoren	Untersuchungsfeld	Wichtige Erkenntnisse zum Inhalt des Neuproduktentwicklungs-Prozesses in Bezug auf Erfolgsfaktoren
Cooper /Klein-schmidt	New Prod I-Projekt: 102 erfolgreiche/ 93 nicht erfolgreiche Projekte in 103 Firmen	Zwei wichtige Erfolgsfaktoren: (1) ein in den Augen der Kunden einzigartiges, hervorragendes Produkt (2) eine starke Markt-Orientierung
Cooper /Klein-schmidt	New Prod II-Projekt: 203 Projekte (123 Erfolge/ 80 Misserfolge) in 125 kanadischen Unternehmen	Erfolgsfaktoren: anfänglicher Screening-Prozess; Testmarkt/technische Einschätzung; detaillierte Marktstudie/ Marktforschung; Geschäfts- und Finanz-Analysen, Produktentwicklung, innerbetriebliche Produkttests, formelle Markteinführungs-Phase, vollständiger NPE-Prozess
Cooper /Klein-schmidt	New Prod II-Projekt: 203 Projekte in 125 kanadischen Unternehmen	Schlüsselfaktoren: herausragendes Produkt mit einzigartigen Vorteile; gut definiertes Produkt vor Entwicklungsphase; Qualität der Durchführung der technologischen Aktivitäten sowie der Vorentwicklungsaktivitäten; Qualität der Durchführung der Marketing Aktivitäten; Marktattraktivität
Cooper /Klein-schmidt	internationale Chemiestudie: 103 (68 erfolgreiche/ 35 nicht-erfolgreiche) Projekte in 21 Firmen	Neue Erfolgsfaktoren:Quelle der Ideen: höchste Erfolgsrate für Lieferanten-initiierte neue Produkte; Phase des Produktlebenszyklus auf dem Markt des neuen Produktes hat einigen Einfluss; Elemente des Produktvorteils sind entscheidend.
Zirger/ Mai-dique	330 Neuprodukte in der Elektronik-Industrie	Neue Produkte müssen bedeutsam für den Kunden sein; strategischer Focus: Firmen sollten Projekte wählen, die auf in der Firma existierende Kompetenzen beruhen.
Song/ Parry	788 Neuprodukt-Projekte in 404 japanischen Firmen	Positiven Einfluss auf den Neuprodukt-Erfolg haben: Vorhandensein eines formalen Prozesses und die kommerzielle Bewertung des Projektes im Projekt-Verlauf
Griffin	Umfrage mit 14751 US-Amerikanern (Rücklaufquote 2,7%)	Ermittelter Erfolgsfaktor: Vorhandensein eines formalen Prozesses
Barczak	365 Geschäftsbereiche in der Telekommunikationsbranche (Rücklaufquote 38%)	Positiven Einfluss auf den Neuprodukt-Erfolg hat: Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase
Mishra /Kim/ Lee	288 erfolgreiche und nicht erfolgreiche Projekte in 144 koreanischen Firmen	Ermittelte Erfolgsfaktoren: Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase, kommerzielle Bewertung des Projektes im Projekt-Verlauf
Calantone /Schmidt/Di Benetto	Befragung von 142 Senoir Manager (115 erfolgreiche und 27 nicht erfolgreiche Produkte)	Positiven Einfluss auf den Neuprodukt-Erfolg hat: Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase
Atuahene-Gima	275 australische Firmen (158 produzierende und 117 aus dem Dienstleistungsbereich)	Ermittelter Erfolgsfaktor Prozess-Orientierung an den Anforderungen des Marktes
Gruner / Homburg	314 Fragebögen auf dem Gebiet des deutschen Maschinenbaus	Eine fokussierte Kundeneinbindung, die in den ersten und den letzten Phasen des Innovationsprozesses intensiv ist, ist erfolgsversprechend; eine selektive Vorgehensweise bei der Wahl der Kooperationspartner ist erfolgsentscheidend.

**Tabelle 18: Wichtige Erkenntnisse zum Inhalt der Neuproduktentwicklungs-Prozesses**

## 5.2 Organisation der Neuproduktentwicklung

Die Wichtigkeit des Verstehens der Organisations-Kultur in einem Marketing-Management ist nach Deshpande und Webster unbestreitbar [65].

Bei der internationalen Chemiestudie gelangten Cooper und Kleinschmidt hinsichtlich der Organisation von Neuproduktentwicklungs-Prozessen zu folgenden Erkenntnissen: Projekte, die von multifunktionalen Teams durchgeführt werden, sind erfolgreicher als Projekte ohne Teams oder Teams, die nur aus Mitgliedern einer Abteilung bestehen. Die Erfolgsrate ist auch höher, wenn das Team für das Projekt von Anfang bis Ende verantwortlich ist und /oder ein starker, bevollmächtigter und engagierter Projektleiter existiert. D.h. es resultierten fünf wesentliche organisatorische Erfolgsfaktoren neuer Produkte<sup>[56]</sup> :

- (1) multifunktional zusammengesetzte Neuproduktentwicklungs-Teams,
- (2) die Existenz eines starken und verantwortlichen Projektleiters,
- (3) die Verantwortung des Neuproduktentwicklungs-Teams für den gesamten Neuproduktentwicklungs-Prozess,
- (4) der Einsatz und das Engagement des Projektleiters und der Teammitglieder <sup>[56]</sup>, sowie
- (5) die intensive Kommunikation zwischen den Teammitgliedern im Prozess-Verlauf <sup>[55]</sup>. In Bezug auf Kommunikation weisen laut Griffin/Hauser wissenschaftliche Belege darauf hin, dass Firmen bei der Neuprodukt-Entwicklung erfolgreicher sind, wenn eine weit reichende Kommunikation zwischen Technik, Marketing und Fertigung existiert <sup>[66]</sup>. Ebadi und Utterback gelangten zur Erkenntnis, dass die Häufigkeit von Kommunikation einen positiven Einfluss und hohe Formalität der Kommunikation einen negativen Einfluss auf den Erfolg einer technologischen Innovation hat <sup>[97]</sup>.

Hinsichtlich der Stellung und Ausgestaltung einer Projektorganisation für die Neuproduktentwicklung im Unternehmen sind folgende Aspekte hervorzuheben:

1. das Projektteam sollte aus Mitgliedern verschiedener funktionaler Bereiche aufgebaut sein [59][67]. Die Ergebnisse der Untersuchungen von Ayers, Dahlstrom und Skinner weisen darauf hin, dass die Integration zwischen R&D und Marketing den Neuprodukt-Erfolg steigert [68],
2. nach den Befunden von Gerwin/Moffat wirkt sich weitgehende Autonomie des Prozess-Teams positiv auf die Leistung des Teams und den Projekterfolg aus [69], des weiteren sind
3. erfolgreiche Neuproduktentwicklung- Projekte durch intensive Kommunikationsbeziehungen zwischen den Team- Mitgliedern gekennzeichnet [70]. Die Marketing-Wechselwirkung mit anderen funktionellen Einheiten wurde von Ruckert und Walker beschrieben und untersucht [71].

Innovationsprozesse können z.B. durch Probleme bei den organisatorischen Schnittstellen behindert werden. Organisatorische Schnittstellen sind in Mehrpersonen-Unternehmen unumgänglich. Sie liegen nach Brockhoff vor, wenn

- 1) es eine Aufgabe zu bewältigen gilt, die zur Lösung die Kooperation mehrerer Stellen erforderlich macht
- 2) die Stellen gleichrangig sind
- 3) für die Lösung der Routineprobleme kein unmittelbarer, weisungsbefugter Vorgesetzter oder eine entsprechende Instanz vorhanden ist,
- 4) die Stellen-Koordination nicht exklusiv durch den Markt erfolgen kann oder soll [72].

Van de Ven und Walker untersuchten die Dynamik von interorganisationaler Koordination. Sie kamen zu den folgenden Schlussfolgerungen:

- 1) der wahrgenommene Bedarf an Ressourcen, um die organisationalen Ziele zu erreichen, ist klar der wichtigste Faktor, der die interorganisationaler Koordination anregt.
- 2) das Muster der interorganisationalen Koordination ist abhängig von der Art, wie die Ressourcen koordiniert werden.

3) die komplexe Rolle von Übereinstimmung oder Konflikt zwischen den interorganisationalen Parteien in der Entwicklung of Koordination zwischen Organisationen verdienen größere Beachtung [73].

Autoren	Untersuchungsfeld	Wichtige Erkenntnisse zur Organisation des Neuproduktentwicklungs-Prozesses in Bezug auf Erfolgsfaktoren
Cooper/ Kleinschmidt	internationale Chemiestudie: 103 (68 erfolgreiche/ 35 nicht-erfolgreiche) Projekte in 21 Firmen	-multifunktional zusammengesetzte Neuproduktentwicklungs-Teams - Existenz eines starken und verantwortlichen Projektleiters -Verantwortung des Neuproduktentwicklungs- Teams für den gesamten Neuproduktentwicklungs- Prozess -Einsatz und Engagement des Projektleiters und der Teammitglieder -intensive Kommunikation zwischen den Teammitgliedern im Prozess-Verlauf
Griffin	Umfrage mit 14751 US-Amerikanern (Rücklaufquote 2,7%)	-Projektteam aus Mitgliedern verschiedener funktionaler Bereiche
Song/ Montoya-Weiss/ Schmidt	Studie in mexikanischen HighTech Firmen; 291 R&D Manager, 122 Produktionsleiter und 185 Marketingleiter (gesamte Rücklaufquote 66%)	-Projektteam aus Mitgliedern verschiedener funktionaler Bereiche
Gerwin/ Moffat	Daten von 55 cross-functional Entwicklungsteams (14 Firmen)	- weitgehende Autonomie des Prozess-Teams
Ayers/ Dahlstrom/ Skinner	115 Ingenieure und Marketing Personen, 19 Neuprodukt-Projekte	-Integration zwischen R&D und Marketing
Balachandra/ Brockhoff/ Pearson	R&D Manager der höchsten Hierarchieebene in 78 deutschen, britischen und US-amerikanischen Großunternehmen	-intensive Kommunikationsbeziehungen zwischen den Teammitgliedern
Ruekert/ Walker	Fragebögen von 95 Marketing Personen (Rücklaufquote 83%), und von 56 Nichtmarketing Personen (Rücklaufquote 81%)	-Marketing-Wechselwirkung mit anderen funktionellen Einheiten
Van den Ven/ Walker	-Studie mit 3 Befragungsrunden, Befragung von 14 Geschäftsstellenleitern	- der wahrgenommene Bedarf an Ressourcen ist der wichtigste Faktor, der die interorganisationaler Koordination anregt. -das Muster der interorganisationalen Koordination ist abhängig von der Art, wie die Ressourcen koordiniert werden.

**Tabelle 19: Wichtige Erkenntnisse zur Organisation des Neuproduktentwicklungs-Prozesses**

### 5.3 Innovationskultur, -grad und -messung

Nach Higgins/Wiese entsteht eine Innovation aus Kreativität und Organisationskultur. Unter Kreativität wird in dem Zusammenhang eine individuelle und gruppenbezogene Kreativität verstanden und unter Organisationskultur die Schaffung eines kreativitätsfördernden Umfeld [74].

Obwohl die Bedeutung von Kultur als eine offensichtlich wichtige Eigenschaft von Unternehmen anerkannt ist, existiert weitgehend keine allgemeine Definition von Unternehmenskultur [75].

Eine mögliche Definition von Kultur ist die folgende: „Kultur ist ein System von geteilten Erkenntnissen. Die menschliche Psyche erzeugt Kultur durch eine begrenzte Anzahl von Regeln“ [76].

Nach Edgar Schein ist die Kultur einer Gruppe *„ein Muster gemeinsamer Grundprämissen, das die Gruppe bei der Bewältigung ihrer Probleme externer Anpassung und interner Integration erlernt hat, das sich bewährt hat und somit als bindend gilt; und das daher an neue Mitglieder als rational und emotional korrekter Ansatz für den Umgang mit diesen Problemen weitergegeben wird.“* [77]

Ernst führte zum Thema „Unternehmenskultur und Innovationserfolg“ eine empirische Studie durch. Diese Studie basiert auf der Einteilung der in Abbildung 38 dargestellten Kultur-Typen nach Cameron/ Freeman.

<b><u>Organische Prozesse:</u></b> Flexibilität, Individualität, Spontaneität	
Typ: Clan	Typ: Adhocracy
Vorherrschende Eigenschaften: Zusammenhalt, Beteiligung, Teamwork, Familiensinn	Vorherrschende Eigenschaften: Kreativität, Unternehmertum, Anpassungsfähigkeit, dynamische Kraft
Führungsstil: Berater, Unterstützer, Vaterfigur	Führungsstil: Unternehmer, Innovator, Risikoträger
Verbindung: Loyalität, Tradition, zwischenmenschlicher Zusammenhalt	Verbindung: Unternehmertum, Flexibilität, Risiko
Strategische Schwerpunkte: Entwicklung der menschlichen Arbeitskräfte, Engagement, Moral	Strategische Schwerpunkte: Innovation, Wachstum, neue Ressourcen
<b><u>Interne Haltung:</u></b> ----- Glättende Aktivitäten, Integration	----- <b><u>Externe Positionierung:</u></b> Wettbewerb, Differenzierung
Typ: Hierarchy	Typ: Market
Vorherrschende Eigenschaften: Ordnung, Regeln und Regulierung, Uniformität, Effizienz	Vorherrschende Eigenschaften: Wettbewerb, Leistung, Austausch mit der Umwelt
Führungsstil: Koordinator, Organisator, Administrator	Führungsstil: Zielorientierung, Produktion, Wettbewerb
Verbindung: Regeln, Grundsätze und Prozeduren, klare Erwartungen	Verbindung: Regeln, Grundsätze und Prozeduren, klare Erwartungen
Strategische Schwerpunkte: Stabilität, Vorhersagbarkeit, reibungslose Arbeitsweise	Strategische Schwerpunkte: Wettbewerbsvorteil und Marktüberlegenheit
<b><u>Mechanistische Prozesse:</u></b> Kontrolle, Ordnung, Stabilität	

**Abbildung 38: Modell kultureller Kongruenz für Organisationen nach Cameron/Freeman<sup>[78]</sup>**

Wesentliche Erkenntnisse der empirischen Analysen von Ernst zu Unternehmenskultur und Innovationskultur sind die folgenden:

- 1) eine innovationsfreundliche Unternehmenskultur (Typ: „Adhocracy“) erhöht deutlich den Innovationserfolg, wohingegen eine stark durch Hierarchie geprägte Unternehmenskultur den Innovationserfolg deutlich verringert. Die Nicht-Linearität des Zusammenhangs lässt darauf schließen, dass es ein optimales Maß der „Adhocracy-Kultur“ gibt,

- 2) drei Kultur-Typen können valide gemessen werden. Die „Market-Kultur“ ist der validen Messung nicht zugänglich. Personen des Marketing-Bereichs sind die geeigneten Informanten,
- 3) der Zusammenhang zwischen Unternehmenskultur und Innovationserfolg ist unabhängig von Umfeldbedingungen. Bei einer moderierten Regressionsanalyse resultierten keine signifikanten Befunde. Eine Erhöhung des Innovationserfolgs kann sowohl bei niedriger als auch bei hoher Technologiedynamik durch eine Adhocracy-Kultur erreicht werden, außerdem begünstigt
- 4) eine hohe Technologiedynamik die „Adhocracy-Kulturen“ und eine niedrige Technologiedynamik die „Hierarchy-Kulturen“ [75] .

Um eine nominale Unterscheidung von Innovationen vorzunehmen, können Dichotomien vorgenommen werden (z.B.: „grundlegend“ versus „instrumental“, „revolutionär“ versus „evolutionär“, „radikale“ versus „inkrementale“, „Pionier-“ versus „Nachfolger-“) [79].

Durch die Angabe der Anzahl der Produktinnovationen ist es möglich im Zeitvergleich innerhalb eines Unternehmens festzustellen, ob innoviert wird und welche Häufigkeitsverteilung über die Zeit vorkommt. Problematisch ist die Angabe der Anzahl der Produktinnovationen z. B. dadurch, dass es an einer einheitlichen, zwischenbetrieblichen und zwischenzeitlich verbindlichen Definition für „neuartige“ Produkte mangelt [80].

Nach Untersuchungen von Hauschildt ist die Forschung noch weit entfernt von einer uniformen Messkonvention. Die Unterschiede ergeben sich bzgl. Messbereich, Messdimension, Messzeitpunkte, Referenzgröße der Messung und Messsubjekt. Basierend auf diesen Ergebnissen entwarf Hausschildt die in Tabelle 20 zusammengestellte prozessbegleitende Erfolgsmessung [81].

<u>Prozessschritte</u>	<u>Ansatzpunkte für die Erfolgsmessung</u>
Produktidee	Protokolle, mehr oder weniger ausgearbeitete Vorlagen
Forschung&Entwicklung	Konstruktionen, Versuchsanlagen, Prototypen
Erfindung	Patente, Publikationen
Investition, Fertigung, Marketing	Marktfähiges Produkt, realisierbares Verfahren
Einführung des Produktes am Markt oder des Verfahrens in der Fertigung	Umsätze, Kostenersparnisse, Deckungsbeiträge
Laufender Verkauf, laufende Nutzung	Veränderungen von Umsätzen, Marktanteilen, Kostenersparnissen, Deckungsbeiträgen im Lebenszyklus

**Tabelle 20: Prozessbegleitende Erfolgsmessung nach Hausschildt [81]**

Autoren	Untersuchungsfeld	Wichtige Erkenntnisse zur Innovationskultur, -grad und -messung
Ernst	Je 86 Informanten aus R&D, Marketing und Produktion	-eine innovationsfreundliche Unternehmenskultur (Typ: „Adhocracy“) erhöht deutlich den Innovationserfolg, eine stark durch Hierarchie geprägte Unternehmenskultur den Innovationserfolg deutlich verringert.
Hauschildt	35 großzahlige Untersuchungen	-die Forschung ist noch weit entfernt von einer uniformen Messkonvention. Die Unterschiede ergeben sich bzgl. Messbereich, Messdimension, Messzeitpunkte, Referenzgröße der Messung und Messsubjekt. Basierend auf diesen Ergebnissen entwarf Hausschildt eine prozessbegleitende Erfolgsmessung

**Tabelle 21: Wichtige Erkenntnisse zur Innovationskultur, -grad und -messung**

## 5.4 Einfluss der Unternehmensleitung

Gemäß der vierjährigen Studie in der Elektronik-Industrie von Zirger und Maidique sind die Vorzüge des Managements kritisch für den Produkt-Erfolg. Produkte sind erfolgreicher, wenn sie gut geplant und implementiert sind. Ohne Management-Unterstützung fehlen die für ein erfolgreiches Projekt notwendigen personellen und finanziellen Ressourcen.

Produkte, die zuerst auf dem Markt sind, sind erfolgreicher. Einführung von Produkten in relativ große und wachsende Märkte führt oft zu Erfolgen. Jedoch ist technologische Führerschaft sehr risikoreich. Innovatoren müssen eine tiefgründige Kunden-Kommunikation und Kunden-Verständnis aufweisen. Technologische Führer müssen prinzipiell potentielle Kunde über den Gebrauch und die Anwendungen des neuen Produktes unterrichten [57].

H. Schmalen und C. Wiedemann untersuchten die Erfolgsdeterminanten von Neuprodukten deutscher Hochtechnologie- Unternehmen. Gemäß dieser Studie trägt das Topmanagement indirekt zum Neuprodukt-Erfolg bei, und zwar durch die Bereitstellung ausreichender Ressourcen und die Befugniserteilung [82].

Zu ähnlichen Erkenntnissen gelangte auch Cooper durch seine Untersuchungen. Geschäfte mit größerem Senior-Management-Engagement bezüglich neuer Produkte bewirken gewinnbringendere neue Produkte. Das Management legt die notwendigen Ressourcen fest, um die Ziele hinsichtlich neuer Produkte zu erreichen. Das Senior Management hat eine zentrale Rolle im Neu-Produkt-Projekt-Überprüfungs-Prozess; es ist stark eingebunden in die Projekt-Abbruch oder -Weiterführungs- sowie in die Ausgaben-Entscheidungen. Ebenso wirkt die Verantwortung des Senior Managements positiv auf den Erfolg neuer Produkte [55][83].

Autoren	Untersuchungsfeld	Wichtige Erkenntnisse zum Einfluss der Unternehmensleitung und des Engagements des Unternehmens auf den Neuproduktentwicklungs-Prozesse in Bezug auf Erfolgsfaktoren
Zirger/ Maidique	330 Neuprodukte in der Elektronik- Industrie	-Management-Unterstützung
Cooper /Klein- schmidt	Benchmarking Studie mit 161 Ge- schäftsbereichen	- Senior-Management-Engagement
Schmalen/ Wiede- mann	Untersuchung von 40 Projekten in Deutschland im Rahmen der INTERPROD-Studie	-Topmanagement trägt durch Bereitstellung ausreichender Ressourcen und Befugniserteilung indirekt zum Neuprodukt-Erfolg bei.

**Tabelle 22: Wichtige Erkenntnisse zum Einfluss der Unternehmensleitung bei Neuproduktentwicklungs-Prozesses**

## 5.5 Strategie der Neuproduktentwicklung

Laut Zirger und Maidique sollten Firmen Projekte wählen, die auf in der Firma existierende technologischen, Marketing- und organisatorischen Kompetenzen beruhen [57]

Schlüsselfaktoren bzgl. Strategie nach den Studien von Griffin sind die folgenden:

- 1) Erfolgreiche Firmen betreiben eher die Produkt-Entwicklungs-Anstrengungen durch spezifische Neuproduktentwicklungs-Strategien sowohl auf Programm- als auch auf Projekt-Ebene.
- 2) Neuproduktentwicklungs-Prozesse, die von erfolgreichen Firmen verwendet werden, beginnen eher mit einem Strategie-Schritt und sind komplexer, da sie mehr Schritte umfassen [59].

Cooper identifiziert ebenfalls eine definierte Neuprodukt-Strategie als Erfolgsfaktor. Diese Neuprodukt-Strategie beinhaltet vier Hauptbestandteile, und zwar:

- 1) Es gibt Ziele für die Neuprodukt-Bemühungen
- 2) Die Rolle der neuen Produkte zur Erreichung der Geschäftsziele ist klar an alle kommuniziert
- 3) Es gibt klar definierte Bereiche des strategischen Fokus zur Ausrichtung der gesamten Neuprodukt-Bemühungen

- 4) Die Neu-Produkt-Bemühungen haben eine langfristige fokussierte Stoßrichtung und schließen einige langfristige Projekte mit ein [55].

Das Technologie- und Innovationsmanagement (TIM) oder auch technologiebezogene Innovationsmanagement beinhaltet:

- die Bereitstellung neuer Technologien für die Firma
- die Durchsetzung des Technologie-Einsatzes in Produkten und/oder Prozessen der Firma
- die Verwertung von neuen Technologien, die durch Firmen erarbeitet wurden [84].

Das integrierte Technologie- und Innovationsmanagement (ITIM) ist nach Zweck gekennzeichnet als:

- Summe technikbegleitender Maßnahmen zur Früherkennung, Analyse, Bewertung und Implementierung von Innovationspotentialen
- mehrwert- und synergiefördernde Integration separater innovationsbegleitender Maßnahmen
- Strategie zur Beschleunigung und Effizienzsteigerung von Innovationen
- den Innovationsprozess (möglichst kontinuierlich) begleitender Vermittlungsprozess
- Generator von Handlungs- und Entscheidungsoptionen und von Orientierungswissen für Entscheidungsträger [85].

Netzwerke sind sehr bedeutsam für kreative Unternehmen. Ein innovatives Netzwerk ist gemäß Hirsch/Tidelski ein formales oder informelles Beziehungsgeflecht, in dem freiwillig und längerfristig miteinander kooperiert wird [86].

Nach Specht/Mieke bewirkt eine Technologiefrühaufklärung in Netzwerken qualitativ höherwertige Aussagen zu zukünftigen technologischen Entwicklungen, verteilt den Aufwand auf mehrere Akteure und schafft die Möglichkeit der kooperativen Technologieentwicklung. Aufgrund der höheren Informationsgüte können Unternehmen effizienter entscheiden, Kompetenzen effektiver nutzen und Ressourcen fokussierter einsetzen. Eine kooperative Technologieentwicklung ermöglicht den Unternehmen die

Erstellung wettbewerbsfähiger Leistungen und reduziert das Risiko, technologische Diskontinuitäten nicht kompensieren zu können. Die Art der Partner, die Form der Kooperation und die Höhe des gegenseitigen Vertrauens sind entscheidende Erfolgskriterien eines Technologiefrühaufklärungsnetzwerkes [87].

Keizer und Vos ermittelten in ihren Studien die grundlegenden Eigenschaften der Risiko Diagnostik Methode (RDM), eine systematische Prozedur zur Identifizierung, Evaluierung und Bewältigung von Risiken bei der Produkt-Entwicklung. Das Ziel der RDM ist es Strategien bereit zu stellen, die die Erfolgs-Chancen von Neuproduktentwicklungs-Projekten durch die Identifizierung und Bewältigung ihrer potentiellen Risiken verbessern. Die Hauptschritte der RDM sind die Risiko-Identifizierung, die Risiko-Festsetzung und die Risiko-Reaktions-Entwicklung- sowie –Kontrolle [88].

## 6 Zum Status Quo der Erfolgs- und Umweltfaktoren von Verfahrensinnovationen auf dem Gebiet der Lackaushärtung

### 6.1 Aufbau und Ausgestaltung des angewandten Forschungsdesigns und Durchführung der empirischen Untersuchung

Im vorherigen Kapitel wurden die bisher auf dem Gebiet der Produkt-Innovationen ermittelten bedeutenden Erfolgsfaktoren dargelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Annahme gemacht, dass für Verfahrens-Innovationen ähnliche Einfluß- und Erfolgsfaktoren existieren wie für Produkt-Innovationen.

Basierend auf dieser Annahme, den im vorhergehenden Kapitel zusammengefassten Erkenntnissen sowie den Erkenntnissen zu Kontingenzfaktoren [89] wird davon ausgegangen, dass der Erfolg einer Verfahrensinnovation auf dem Gebiet der Lackaushärtung durch unternehmensinterne Erfolgsfaktoren wie formaler Prozess, durch externe Erfolgsfaktoren wie Kundeneinbindung, durch den Innovationsgrad sowie durch die patentrechtliche Absicherung beeinflusst werden kann (siehe Abbildung 39). Im Rahmen dieser Arbeit soll nun ermittelt werden, welche dieser potentiellen Erfolgsfaktoren tatsächlich von Bedeutung für den Erfolg einer Verfahrensinnovation im Lackaushärtungsbereich sind.

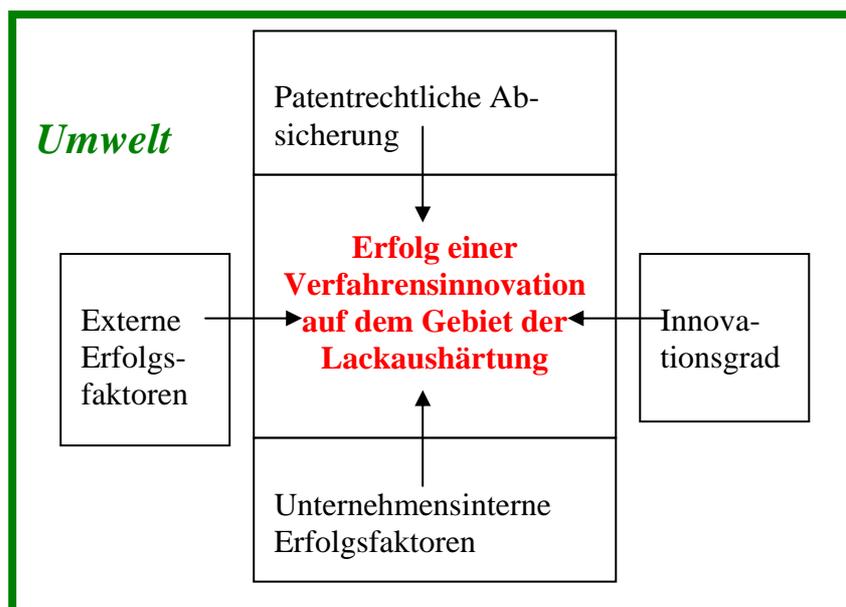
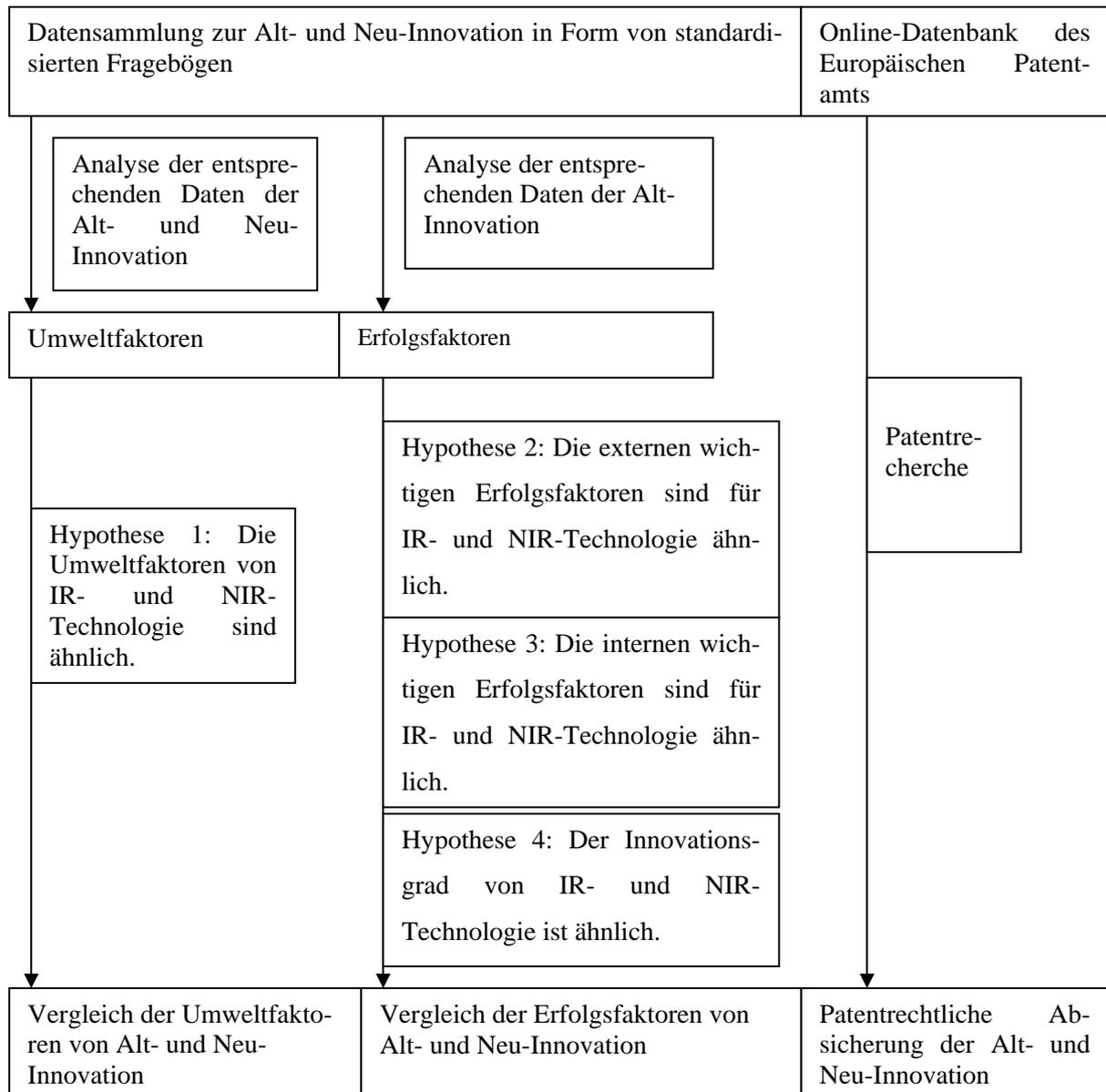


Abbildung 39: Mögliche Einflussfaktoren des Erfolgs einer Verfahrensinnovation im Lackaushärtungsbereich

Der prinzipielle Aufbau des Forschungsdesigns der vorliegenden Arbeit ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 40: Prinzipieller Aufbau des Forschungsdesigns**

Um Informationen zum Innovationstatus, zu verschiedenen Projekten der betreffenden Innovationen sowie zu den Interviewpartnern zu erhalten, wurden vorab Telefonate durchgeführt. Anschließend erfolgte eine direkte Übermittlung der standardisierten

Fragebögen in elektronischer Form. Alle Fragen wurden in geschlossener Form<sup>11</sup> unter Verwendung einer fünfstufigen Likert-Skala<sup>12</sup> gestellt. Um zu gewährleisten, dass die Aussagen nicht mit großer Unsicherheit behaftet zur Auswertung herangezogen werden, sollte jeder Ansprechpartner zur jeweiligen Frage die Sicherheit, mit der er die Frage beantwortet hat, angeben<sup>13</sup>. Die Auswertung der Daten erfolgt deskriptiv<sup>14</sup> [90] [91] [92][93].

Erfolg ist gemäß Griffin/Page vielschichtig und schwer zu messen [94]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Erfolg der Alt-Innovation durch Selbstauskunft der Interviewpartner bestimmt. Da sich die Auskünfte unabhängig vom Land gleichen, ist von einer relativ guten Bestimmung des „Erfolgsgrads“ auszugehen.

Nach der Datensammlung mittels der Fragebögen werden anhand einer Analyse die Eigenschaften der Umweltfaktoren des Lackmarktes in Abhängigkeit von Land und Technologie ermittelt. Basierend auf dieser Analyse wird die Hypothese 1, dass die Umweltfaktoren von IR- und NIR-Technologie ähnlich sind, überprüft. Als Umweltfaktoren wurden für diese Arbeit die Markt- und Technologiedynamik, sowie die Wettbewerbsintensität definiert.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen nicht nur die Projekte eines Landes, sondern die mehrerer Länder untersucht werden, um festzustellen, ob regionale Unterschiede vorhanden sind<sup>15</sup>[95][61].

---

<sup>11</sup> Ausnahmen: Fragen zum Themenkomplex „Kooperation“ (Kombination von geschlossener und offener Form) und „Prozesssteuerung“ (offene Form).

<sup>12</sup> Eins= sehr starke Zustimmung, fünf= sehr starke Ablehnung

<sup>13</sup> Diese Sicherheitsangabe wurde mittels einer dreistufigen Likert-Skala durchgeführt (Eins=große Sicherheit, Drei= große Unsicherheit). Aussagen zu einem Fragenkomplex wurden nur gewertet, wenn die Unsicherheit 50% oder weniger betrug. Keine Angabe zur Sicherheit wurde als Unsicherheit bewertet.

<sup>14</sup> Aufgrund der geringen Anzahl von Interviewpartnern pro Untersuchungseinheit erfolgte keine Multitrait-Multimethod(MTMM)-Analyse nach Campbell/Fiske, keine Korrelations-Berechnung und auch keine konfirmatorische Faktoren-Analyse oder -Messung.

<sup>15</sup> Diller& Lücking gelangten in ihrer Studie zum Thema "Die Resonanz der Erfolgsfaktorenforschung beim Management von Großunternehmen" zur Erkenntnis, dass die Manager von Deutschland, Japan und den USA in Abhängigkeit vom Land von unterschiedlichen Wirkungsvoraussetzungen ausgehen, wenn sie ihre Marketingstrategien formulieren. Es hat sich dabei angedeutet, dass eine Art nationaler Strategiestil existiert, der das Verhalten des jeweiligen Managers prägt. Mishra et al. gelangten zu einem ähnlichen Urteil, und zwar, dass es keine globale Formel für den Erfolg von Neuprodukten gibt.

In Hinsicht auf Produkt-Innovationen wurden, wie bereits am Anfang dieses Kapitels erwähnt, in früheren Arbeiten zahlreiche wichtige Erfolgsfaktoren bestimmt. Um die wichtigen Erfolgsfaktoren einer Verfahrensinnovation auf dem Gebiet der Lackaushärtung zu ermitteln, werden daher Befragungen zu im Bereich von Produkt-Innovationen bedeutenden Erfolgsfaktoren durchgeführt.

Durch die Analyse der entsprechenden Daten zur Alt-Innovation "IR-Technologie" wurden dann die für eine Verfahrensinnovation auf dem Gebiet der Lackaushärtung wichtigen Erfolgsfaktoren bestimmt. Abschließend werden durch Vergleich mit den Daten zur Neu-Innovation „NIR-Technologie“ die Hypothesen zwei bis vier, die von ähnlichen wichtigen Erfolgsfaktoren und ähnlichen Innovationsgraden sowohl für IR- als auch für NIR-Technologie ausgehen, auf Richtigkeit überprüft.

Um die patentrechtliche Absicherung zu untersuchen, wird eine Patentrecherche sowohl zur Alt-Innovation "IR-Trocknung von Lacken" als auch zur Neu-Innovation "NIR-Trocknung von Lacken" in der weltweiten Online-Datenbank des Europäischen Patentamts durchgeführt.

Die dabei erhaltenen Rohdaten werden wie folgt bereinigt und danach ausgewertet: Zum Thema "IR-Trocknung von Lacken" werden Patente auf dem Gebiet der Halbleiter-Technik, der Analytik und der Medizin nicht berücksichtigt. Des Weiteren bleiben Patente, die nur IR-Strahler (ohne Bezug zu Lacksystemen etc.) betreffen, unberücksichtigt, genauso wie Patente, die sich auch auf NIR-Strahlung beziehen.

Zum Thema "NIR-Trocknung von Lacken" werden Patente hinsichtlich NIR-Strahlern (ohne Bezug zu Lacksystemen etc.) nicht in die Auswertung mit einbezogen. Außerdem werden Patente der Bereiche Halbleiter-Technik, Analytik und Medizin außer Acht gelassen.

Diese Bereinigung wurde vorgenommen, um nur die für den Lack-Polymer-Bereich relevanten Patente zu berücksichtigen.

## 6.2 Die Untersuchungseinheiten

Um repräsentative Stichproben zu erhalten, wurden verschiedene Abteilungen des Lack-Bereichs des internationalen Chemie-Konzerns DuPont sowie von kooperierenden Strahler-Herstellern<sup>16</sup> interviewt.

Die Grobeinteilung der Untersuchungseinheiten erfolgte nach den Kriterien Land (USA, Deutschland, Frankreich), Technologie (Alt-Innovation „IR-Technologie“, Neu-Innovation „NIR-Technologie“) und Unternehmen (internationaler Chemie-Konzern DuPont, kooperierende Strahler-Hersteller<sup>17</sup>). Innerhalb der Untersuchungseinheiten der Firma DuPont fand, wenn möglich, eine weitere Unterteilung in Abhängigkeit vom jeweiligen Betätigungsfeld d.h. nach den funktionalen Bereichen, wie Marketing, R&D, Verfahrenstechnik etc., statt.

Die Personen der Untersuchungseinheiten „IR-Technologie in Deutschland“ und „IR-Technologie in Frankreich“ wurden zu Flüssiglack-IR-Autolack-Projekten in ihrem Land befragt. Laut den vor der Befragung durchgeführten Telefonaten ist in Deutschland die Anwendung von Infrarotstrahlung im Flüssiglack-Automobil-Bereich ein seit ca. 15 Jahren erfolgreiches Verfahren. In Frankreich dagegen kommen Infrarotstrahlen erst seit ca. 3-4 Jahren bei einigen DuPont-Automobil-Kunden zum Einsatz. Die Untersuchungseinheiten „NIR-Technologie in Deutschland“ wurden allgemein zu NIR-Projekten im Pulverlackbereich interviewt.

---

<sup>16</sup> Die Kooperationspartner wurden nur hinsichtlich der Umweltfaktoren, des Innovationsgrades sowie in Bezug auf die Zufriedenheit mit der Kooperationsform befragt.

<sup>17</sup> Fragebogen von Strahler-Herstellern liegen nur zur „IR-Technologie in Deutschland“ sowie zur „NIR-Technologie in Deutschland“ und zur „NIR-Technologie in den USA“ vor. Daher erfolgt eine Einteilung nach Unternehmen auch nur in diesen drei Fällen.

Die Fragen zur „NIR-Technologie in Frankreich“ wurden zu einem NIR-Pulverlack-Coil-Coating-Projekt beantwortet. Die NIR-Anlage zu diesem Projekt ist bereits beim Kunden in Betrieb genommen worden.

Zur IR-Technologie in den USA gab es zwei Untersuchungseinheiten innerhalb der Firma DuPont: Es wurde ein weniger erfolgreiches IR-Projekt sowie erfolgreiche IR-Projekte untersucht.

Die Personen des weniger erfolgreichen US-IR-Projektes wurden zu einem US-amerikanischen IR-Projekt des Flüssiglack-Autolack-Bereichs befragt. Das zuerst gesetzte Ziel dieses Projektes, die Anwendung von Infrarot-Strahlen zur Flüssiglack-Aushärtung, konnte nicht realisiert werden. Das Projekt wurde letztendlich in der Form umgesetzt, dass der Kunde in seiner Anlage die Infrarotstrahlen zur Entfernung des Wassers aus dem Wasserlack verwendet und die eigentliche Aushärtung mit einer alternativen Wärmequelle vollzieht.

Die Ansprechpartner der erfolgreichen US-IR-Projekte wurden zu IR-Projekten des Automobil-Reparatur-Lack-Bereichs interviewt.

In den USA ist eine NIR-Pulverlack-Anlage bereits in Betrieb genommen worden. Auf das dazugehörige Kunden-Projekt bezieht sich der Fragebogen der Untersuchungseinheiten „NIR-Technologie in den USA“.

Nachteilig für die empirische Studie ist, dass einzelne Untersuchungseinheiten teilweise von sehr geringer Größe sind und nur ein bis zwei Personen befragt werden konnten. Dieses Problem war nicht völlig zu vermeiden, da für die untersuchten Projekte teils nur ein oder zwei Personen zuständig waren.

Es wurden insgesamt 33 Fragebögen ausgewertet. Die Rücklaufquote betrug, wie die folgende Tabelle zeigt, 56%.

Untersuchungseinheit	Rücklauf [%]
IR/Deutschland/DuPont	53
IR/ Deutschland/Strahler-Hersteller	100
NIR/Deutschland/ DuPont	50
NIR/Deutschland/Strahler-Hersteller	50
IR/Frankreich/DuPont	57
NIR/Frankreich/ DuPont	67
IR weniger erfolgreich/USA/Du Pont	67
IR erfolgreich/USA/Du Pont	22
NIR/USA/DuPont	67
NIR/USA/ Strahler-Hersteller	100
Gesamter Rücklauf	56

**Tabelle 23: Rücklauf der Fragebögen**

### **6.3 Ergebnisse zum Status Quo der Umwelt- und Erfolgsfaktoren neuer Verfahren in der Lack-Industrie**

#### *6.3.1 Umweltfaktoren des US-amerikanischen, des deutschen und des französischen Lackmarktes*

Unter den Umweltfaktoren werden im Rahmen dieser Arbeit die Marktdynamik, die Wettbewerbsintensität und die Technologiedynamik verstanden.

Alle drei untersuchten Lack-Märkte gelten nach den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Befragungen als weder besonders dynamisch noch besonders starr, mit sehr leichter Tendenz zum Dynamischen bei den deutschen und US-amerikanischen Lackmärkten (siehe Tabelle 24-Tabelle 26)<sup>18</sup>.

Ein dynamischer Markt ist gekennzeichnet durch im zeitlichen Verlauf sich sehr stark veränderte Kundenanforderungen, fortwährende Nachfrage nach neuen Produkten, Nachfragen von Neukunden mit neuartigen Produkthanforderungen (vergleiche Tabelle 66).

Die Skalierung der möglichen Antworten reicht von 1 bis 5, wobei 1 starke Zustimmung (sehr dynamisch), 5 starke Ablehnung (sehr starr) und 3 neutral bedeutet.

<b><u>Deutscher Lack-Markt: Marktdynamik</u></b>							
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>							
<u>DuPont</u>				<u>Strahler-Hersteller</u>			
R&D (n=1)	Marke- ting (n=1)	Verfahrens- technik (n=5)	Gesamt (n=7)	Hersteller1 (n=2)	Hersteller2 (n=3)	Hersteller3 (n=2)	Gesamt (n=7)
3,0	1,6	3,0	2,8	3,0	2,9	3,4	3,1
Mittelwert gesamt (IR) (n=14)							
2,9							
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>							
<u>DuPont</u>				<u>Strahler-Hersteller</u>			
R&D (n=2)	Marketing (n=2)		Gesamt (n=4)	Hersteller 1 (n=1)		Gesamt(n=1)	
2,4	2,6		2,5	2,6		2,6	
Mittelwert gesamt (NIR) (n=5)							
2,5							
Mittelwert gesamt (Deutschland) (n=19)							
2,8							

**Tabelle 24: Bewertung der Marktdynamik des deutschen Lack-Marktes**

<b><u>Französischer Lack-Markt: Marktdynamik</u></b>		
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>		
<u>DuPont</u>		
R&D (n=2)	Marketing (n=0)	Gesamt (n=2)
3,1	-	3,1
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>		
<u>DuPont</u>		
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
2,4	3,2	2,8
Mittelwert gesamt (Frankreich) (n=4)		
3,0		

**Tabelle 25: Bewertung der Marktdynamik des französischen Lack-Marktes**

<sup>18</sup> Die einzelnen Variablen des Umweltfaktors „Marktdynamik“ sind in Fragebogenform unter 6.3.6 aufgeführt

<b><u>US-amerikanischer Lack-Markt: Marktdynamik</u></b>				
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>				
<u>DuPont</u>				
Wenig erfolgreich (n=2)		Erfolgreich (n=1)	Gesamt (n=3)	
2,8		2,8	2,8	
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>				
<u>DuPont</u>			<u>Strahler-Hersteller</u>	
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	Hersteller 1 (n=1)	Gesamt (n=1)
2,8	3,0	2,9	2,2	2,2
Mittelwert gesamt (NIR) (n=5)				
2,7				
Mittelwert gesamt (USA) (n=8)				
2,7				

**Tabelle 26: Bewertung der Marktdynamik des US-amerikanischen Lack-Marktes**

Der Wettbewerb für Verfahrensinnovationen im Lackaushärtungsbereich wurde in Frankreich, Deutschland und in den USA, wie in der Tabelle 27 bis Tabelle 29 ersichtlich, von den Interviewpartnern als weder besonders intensiv noch besonders schwach, tendenziell leicht intensiv, eingestuft.

Die Wettbewerbsintensität ist charakterisiert durch einen starken Wettbewerb, Produkte, die auch sofort vom Wettbewerber angeboten werden, harter Preiswettbewerb, täglich neue Aktivitäten der Wettbewerber (vergleiche Tabelle 67).

<b><u>Deutscher Lack-Markt: Wettbewerbsintensität</u></b>							
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>							
<u>DuPont</u>				<u>Strahler-Hersteller</u>			
R&D (n=1)	Marketing (n=2)	Verfahrens- technik (n=4)	Gesamt (n=7)	Hersteller1 (n=2)	Hersteller2 (n=3)	Hersteller3 (n=2)	Gesamt (n=7)
1,8	2,0	1,9	1,9	3,6	2,3	2,5	2,7
Mittelwert gesamt (IR) (n=14)							
2,3							
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>							
<u>DuPont</u>				<u>Strahler-Hersteller</u>			
R&D (n=2)	Marke- ting (n=2)	Gesamt (n=4)		Hersteller 1 (n=1)	Gesamt (n=1)		
2,1	3,1	2,6		3,0	3,0		
Mittelwert gesamt (NIR) (n=5)							
2,7							
Mittelwert gesamt (Deutschland) (n=19)							
2,4							

**Tabelle 27: Bewertung der Wettbewerbsintensität des deutschen Lack-Marktes**

<b><u>Französischer Lack-Markt: Wettbewerbsintensität</u></b>		
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>		
<u>DuPont</u>		
R&D (n=2)	Marketing (n=0)	Gesamt (n=2)
2,5	-	2,5
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>		
<u>DuPont</u>		
R&D (n=0)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=1)
-	3,2	3,2
Mittelwert gesamt (Frankreich) (n=3)		
2,7		

**Tabelle 28: Bewertung der Wettbewerbsintensität des französischen Lack-Marktes**

<b><u>US-amerikanischer Lack-Markt: Wettbewerbsintensität</u></b>				
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>				
<u>DuPont</u>				
Wenig erfolgreich (n=2)		Erfolgreich (n=1)		Gesamt (n=3)
2,3		1,6		2,1
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>				
<u>DuPont</u>			<u>Strahler-Hersteller</u>	
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	Hersteller 1 (n=1)	Gesamt (n=1)
2,4	2,6	2,5	2,6	2,6
Mittelwert gesamt (NIR) (n=3)				
2,5				
Mittelwert gesamt (USA) (n=6)				
2,3				

**Tabelle 29: Bewertung der Wettbewerbsintensität des US-amerikanischen Lack-Marktes**

Die Technologien der Verfahrensinnovationen auf dem Gebiet der Lackaushärtung werden von den befragten Personen als weder besonders dynamisch noch besonders starr, mit sehr leichter Tendenz zum Dynamischen eingeschätzt (siehe Tabelle 30 bis Tabelle 32).

Die Technologiedynamik weist folgende Eigenschaften auf: sich sehr schnell veränderte Technologien, technologische Veränderungen bedeuten große Chancen, kaum technologische Prognosen möglich, Neuprodukte meist erst durch technologische Durchbrüche möglich, sehr häufig wichtige technologische Veränderungen (vergleiche Tabelle 68).

<b><u>Deutscher Lack-Markt: Technologiedynamik</u></b>							
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>							
<u>DuPont</u>				<u>Strahler-Hersteller</u>			
R&D (n=1)	Marketing (n=2)	Verfahrens- technik (n=5)	Gesamt (n=8)	Hersteller1 (n=2)	Hersteller2 (n=3)	Hersteller3 (n=2)	Gesamt (n=7)
3,0	2,7	2,4	2,6	2,3	2,7	2,9	2,7
Mittelwert gesamt (IR) (n=15)							
2,6							
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>							
<u>DuPont</u>			<u>Strahler-Hersteller</u>				
R&D (n=2)	Marketing (n=2)	Gesamt (n=4)		Hersteller 1 (n=0)		Gesamt (n=0)	
2,8	2,3	2,6		-		-	
Mittelwert gesamt (NIR) (n=4)							
2,6							
Mittelwert gesamt (Deutschland) (n=19)							
2,6							

**Tabelle 30: Bewertung der Technologiedynamik des deutschen Lack-Marktes**

<b><u>Französischer Lack-Markt: Technologiedynamik</u></b>		
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>		
<u>DuPont</u>		
R&D (n=2)	Marketing (n=0)	Gesamt (n=2)
2,8	-	2,8
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>		
<u>DuPont</u>		
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
2,2	2,4	2,3
Mittelwert gesamt (Frankreich) (n=4)		
2,6		

**Tabelle 31: Bewertung der Technologiedynamik des französischen Lack-Marktes**

<b><u>US-amerikanischer Lack-Markt: Technologiedynamik</u></b>				
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>				
<u>DuPont</u>				
Wenig (n=2)	erfolgreich	Erfolgreich (n=1)	Gesamt (n=3)	
2,5		2,4	2,5	
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>				
<u>DuPont</u>			<u>Strahler-Hersteller</u>	
R&D (n=1)	Marke- ting (n=1)	Gesamt (n=2)	Hersteller 1 (n=0)	Gesamt (n=0)
3,0	3,0	3,0	-	-
Mittelwert gesamt (NIR) (n=2)				
3,0				
Mittelwert gesamt (USA) (n=5)				
2,7				

**Tabelle 32: Bewertung der Technologiedynamik des US-amerikanischen Lack-Marktes**

Die Aussagen zu den drei Untersuchungsfeldern Marktdynamik, Wettbewerbsintensität und Technologiedynamik sind weitestgehend unabhängig davon, ob die befragte Person auf dem Gebiet der IR- oder der NIR-Technologie tätig ist oder ob die interviewte Person für DuPont oder für einen Kooperationspartner von DuPont arbeitet.

Die Hypothese 1, die von ähnlichen Umweltfaktoren für NIR- und IR-Technologie ausgeht, kann somit bestätigt werden. Die Umweltfaktoren, das heißt die Markt- und Technologiedynamik sowie die Wettbewerbsintensität, sind, wie die im Rahmen dieser Arbeit angestellten Untersuchungen zeigen, für IR- und NIR-Technologie in etwa gleich.

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass die Umweltfaktoren in den USA, Deutschland und in Frankreich einheitlich als leicht dynamisch bzw. leicht intensiv angesehen werden können. Eine Ausnahme bildet die Marktdynamik in Frankreich, die als weder dynamisch noch starr eingeschätzt wird.

### 6.3.2 Wichtige Erfolgsfaktoren der Abstimmung der F&E-Aktivitäten mit externen Faktoren

Das Ziel dieses Unterkapitels ist es, die Erfolgsfaktoren zu ermitteln, die für die Abstimmung der unternehmensinternen F&E-Aktivitäten mit den externen Faktoren Markt-Orientierung, Kunde und Kooperation von Bedeutung sind. Basierend auf früheren Arbeiten zum Thema „Neuprodukt-Entwicklung“ (vergleiche 5) wurden diese drei Faktoren als einflussreich für den Erfolg von Verfahreninnovationen im Lack-aushärtungsbereich erachtet.

Die Bedeutung dieser Erfolgsfaktoren wird über deren Bewertung durch die Interviewpartner in Verbindung mit dem Erfolg der zugrunde liegenden Projekte bestimmt.

Die mittels Fragebögen ermittelten Werte sind in Tabelle 33 dargestellt (1=starke Zustimmung; 5=starke Ablehnung; 3=neutral).

<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>								
<u>Deutschland</u>				<u>Frankreich</u>			<u>USA</u>	
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Verfahrenstechnik (n=3)	Gesamt (n=6)	R&D (n=2)	Marketing (n=0)	Gesamt (n=2)	Wenig erfolgreich (n=1)	Erfolgreich (n=2)
2,4	2,7	2,4	2,4	2,3	-	2,3	2,0	1,9
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>								
<u>Deutschland</u>			<u>Frankreich</u>			<u>USA</u>		
R&D (n=2)	Marketing (n=2)	Gesamt (n=4)	R&D (n=0)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=1)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
2,9	1,9	2,4	-	3,5	3,5	2,8	3,0	2,9

**Tabelle 33: Bewertung der Markt-Orientierung durch die Interviewpartner**

Auffallend ist, dass die Abstimmung mit der Markt-Orientierung durchschnittlich bei der Neu-Innovation NIR schlechter bewertet wurde als bei der Alt-Innovation IR.

Die Antworten der unterschiedlichen funktionalen Bereiche innerhalb einer Untersuchungseinheit stimmen weitestgehend überein. Eine Ausnahme stellen die deutschen NIR-Projekte dar. Die Personen des R&D-Bereichs sehen die Orientierung des Prozesses an den Markt-Anforderungen als weder gut noch schlecht an, demgegenüber beurteilen die Interviewpartner des Marketing-Bereichs sie als gut. Die Orientierung des Prozesses an den Markt-Anforderungen zählt zu den Aufgabenbereichen des Marketings, d.h. die Marketing-Personen beurteilen ihre eigene Leistung besser als die des anderen Bereichs.

Die Abstimmung der unternehmensinternen F&E-Aktivitäten des weniger erfolgreichen USA-IR-Projektes mit der Markt-Orientierung wurde als gut angesehen. Der Grund für den geringen Erfolg scheint somit nicht in der fehlenden Markt-Orientierung zu liegen.

Außerdem ist gemäß diesen Daten die Markt-Orientierung kein wichtiger Erfolgsfaktor, da die im Rahmen dieser Arbeit erfolgreichsten Projekte, die deutschen IR-Projekte, nicht die beste Markt-Orientierung aufweisen.

In Bezug auf die Kundeneinbindung ergaben sich die in Tabelle 34 zusammengefassten Daten.

<b>Alt-Innovation „IR-Technologie“</b>								
Deutschland				Frankreich			USA	
R&D (n=2)	Marketing (n=1)	Verfahrenstechnik (n=4)	Gesamt (n=6)	R&D (n=2)	Marketing (n=0)	Gesamt (n=2)	Weniger erfolgreich (n=1)	Erfolgreich (n=2)
2,4	2,4	1,9	2,1	2,8	-	2,8	2,3	2,9
<b>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</b>								
Deutschland			Frankreich			USA		
R&D (n=2)	Marketing (n=2)	Gesamt (n=4)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
2,6	1,9	2,3	1,9	2,6	2,2	3,0	3,1	3,1

**Tabelle 34: Bewertung der Kundeneinbeziehung**

Bezüglich der im Rahmen dieser Arbeit erfolgreichsten Innovation, die der deutschen IR-Projekte, wurde die Abstimmung mit den Kunden als am besten beurteilt. Da jedoch das weniger erfolgreiche USA-IR-Projekt eine bessere Kundeneinbeziehung als die erfolgreichen USA-IR-Projekte aufweist, wird die Kundeneinbindung nicht als wichtiger Erfolgsfaktor angesehen. Die Konvergenz der Antworten der unterschiedlichen funktionalen Bereiche innerhalb einer Untersuchungseinheit ist überwiegend gut.

Die beiden Befunde, dass die Markt-Orientierung und die Kundeneinbindung des weniger erfolgreichen US-amerikanischen Projektes besser sind als die der erfolgreicheren Projekte, sind ungewöhnlich. Es ist daher möglich, dass die befragten Personen, die Sachverhalte, für die sie selbst verantwortlich sind, viel positiver bewertet haben, als sie tatsächlich waren. In späteren Arbeiten könnten daher außenstehende Personen, die in das weniger erfolgreiche US-amerikanische Projekt involviert waren, befragt werden, um die erhaltenen Befunde zu überprüfen bzw. zu widerlegen.

In Deutschland, in Frankreich und in den USA sind die Kooperationen mit den Strahler-Herstellern ähnlich aufgebaut. In Hinsicht auf die IR-Projekte arbeitet DuPont mit mehreren Strahler-Herstellern in eher loser nicht-vertraglicher Form zusammen. Die Kooperationsform der NIR-Projekte besteht hingegen aus der Kooperation mit nur einem einzigen Strahler-Hersteller mit vertraglicher Festlegung der Kooperationsziele.

In allen drei untersuchten Ländern sind die IR-Personen sehr viel zufriedener mit ihren Kooperationspartnern und ihrer Kooperationsform als die NIR-Personen des jeweiligen Landes (siehe Tabelle 35).

<b>Alt-Innovation „IR-Technologie“</b>								
Deutschland				Frankreich			USA	
R&D (n=1)	Marke- ting (n=2)	Verfah- renstech- nik (n=5)	Ge- samt (n=8)	R&D (n=2)	Marke- ting (n=0)	Ge- samt (n=2)	Wenig erfolg- reich (n=1)	Erfolgreich (n=1)
2,5	2,5	2,1	2,3	3,0	-	3,0	3,0	2,5
<b>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</b>								
Deutschland			Frankreich			USA		
R&D (n=2)	Marketing (n=2)	Gesamt (n=4)	R&D (n=1)	Marke- ting (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marke- ting (n=1)	Gesamt (n=2)
3,3	3,0	3,1	4,5	4,5	4,5	4,0	3,5	3,8

**Tabelle 35: Bewertung der Zufriedenheit mit der Kooperationsform und den Kooperationspartnern**

Bei den deutschen, den erfolgreichsten hier untersuchten IR-Projekten wurden die Kooperationsform und die Kooperationspartner am besten eingestuft. Kooperationsform und Kooperationspartner sind somit laut diesen Untersuchungen sehr wichtige Erfolgsfaktoren.

Da bei den IR-Strahler-Herstellern nur Daten aus Deutschland vorliegen, kann kein Länder-Vergleich erfolgen. Die Daten werden daher hinsichtlich Alt- und Neu-Innovation miteinander verglichen. Wie in Tabelle 36 ersichtlich, schätzen die Strahler-Hersteller die Kooperationsform der Alt-Innovation besser ein als die der Neu-Innovation.

Alt-Innovation „IR-Technologie“ ; gesamt (n=6)
2,5
Neu-Innovation „NIR-Technologie“; gesamt (n=2)
3,0

**Tabelle 36: Bewertung der Zufriedenheit mit der Kooperationsform (Strahler-Hersteller)**

Die Tabelle 37 fasst die erhaltenen Daten der Bewertung einer Kooperation mit mehreren Kooperationspartnern zusammen. Eine Kooperation mit mehreren Kooperationspartnern wird als geeigneter angesehen im Vergleich mit einer Kooperation mit nur einem Kooperationspartner.

<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>								
Deutschland				Frankreich			USA	
R&D (n=1)	Marketing (n=2)	Verfahrenstechnik (n=5)	Gesamt (n=8)	R&D (n=2)	Marketing (n=0)	Gesamt (n=2)	Wenig erfolgreich (n=1)	Erfolgreich (n=1)
2,0	3,0	2,6	2,6	2,0	-	2,0	3,0	2,0
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>								
Deutschland			Frankreich			USA		
R&D (n=2)	Marketing (n=2)	Gesamt (n=4)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
3,0	3,0	3,0	1,0	2,0	1,5	3,0	4,0	3,5
Mittelwert gesamt								
2,6								

**Tabelle 37: Bewertung einer Kooperation mit mehreren Kooperationspartnern**

Die Beurteilung einer festen vertraglichen Kooperation ist in Tabelle 38 ersichtlich. Eine feste vertragliche Kooperation wird für geeigneter eingeschätzt als eine lose Kooperation.

<b>Alt-Innovation „IR-Technologie“</b>								
Deutschland				Frankreich			USA	
R&D (n=1)	Marketing (n=2)	Verfahrenstechnik (n=5)	Gesamt (n=8)	R&D (n=2)	Marketing (n=0)	Gesamt (n=2)	Wenig erfolgreich (n=1)	Erfolgreich (n=1)
2,0	2,5	2,6	2,5	3,0	-	3,0	3,0	2,0
<b>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</b>								
Deutschland			Frankreich			USA		
R&D (n=2)	Marketing (n=2)	Gesamt (n=4)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
2,0	2,0	2,0	4,0	2,0	3,0	3,0	2,0	2,5
Mittelwert gesamt								
2,5								

**Tabelle 38: Bewertung einer festen vertraglichen Kooperation**

Laut der Hypothese 2 sollten die externen Erfolgsfaktoren, also Kooperationsform und Kooperationspartner, für IR- und NIR-Technologie ähnlich sein. Nach den vorhergehenden Befunden muss dieser Hypothese widersprochen werden.

### *6.3.3 Erfolgsfaktoren innerhalb des untersuchten Chemie-Konzerns*

Die Beurteilung des formalen Prozesses durch die Interviewpartner ist in Tabelle 39 zusammengestellt.

<b>Alt-Innovation „IR-Technologie“</b>								
Deutschland				Frankreich			USA	
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Verfahrenstechnik (n=3)	Gesamt (n=5)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	Weniger erfolgreich (n=2)	Erfolgreich (n=2)
2,0	2,3	2,3	2,3	2,5	2,3	2,4	2,8	2,4
<b>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</b>								
Deutschland			Frankreich			USA		
R&D (n=2)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=3)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marketing (n=0)	Gesamt (n=2)
3,0	2,8	2,9	2,8	2,5	2,6	3,3		3,3

**Tabelle 39: Bewertung des formalen Prozesses**

Da die deutsche IR-Technologie von allen sieben DuPont-Untersuchungseinheiten bei weitem die erfolgreichste darstellt und gemäß diesen Daten den besten formalen Prozess aufweist, stellt der formale Prozess einen wichtigen Erfolgsfaktor dar.

Die erfolgreichen USA-IR-Projekte weisen einen besseren formalen Prozess auf, als das weniger erfolgreiche USA-IR-Projekt. Ein Grund für den geringen Erfolg des untersuchten weniger erfolgreichen USA-IR-Projektes könnte somit der zu geringe formale Prozess sein.

Die Aussagen zum formalen Prozess zwischen den verschiedenen Sektoren einer Untersuchungseinheit konvergieren sehr gut.

Die Werte der Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase sind in der Tabelle 40 dargestellt.

<b>Alt-Innovation „IR-Technologie“</b>								
Deutschland				Frankreich			USA	
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Verfahrenstechnik (n=4)	Gesamt (n=6)	R&D (n=1)	Marketing (n=2)	Gesamt (n=3)	Wenig erfolgreich (n=2)	Erfolgreich (n=2)
2,2	2,8	2,2	2,3	3,0	2,4	2,6	2,1	2,0
<b>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</b>								
Deutschland			Frankreich			USA		
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
2,5	2,0	2,2	2,0	3,7	2,8	2,8	3,5	3,2

**Tabelle 40: Bewertung der Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase**

Die Beurteilungen weisen zwischen den unterschiedlichen funktionalen Bereichen eine gute Übereinstimmung auf. Eine Ausnahme stellt das französische NIR-Projekt dar, bei dem zwischen Marketing und R&D-Abteilung große Divergenzen auftreten (2,0 (R&D) und 3,7 (Marketing)).

Die erfolgreichste Innovation, die der deutschen IR-Projekte, wurde in Bezug auf die kommerzielle Bewertung im Projektverlauf, wie in Tabelle 41 ersichtlich, erstaunlicherweise schlechter bewertet als die US-amerikanischen IR-Projekte. Der Faktor „Kommerzielle Bewertung des Projektes in seinem Verlauf“ ist nach diesen Resultaten innerhalb des untersuchten Unternehmens im Lackbereich eher unbedeutend für den Erfolg. Zwischen den Antworten der verschiedenen funktionalen Bereiche ergeben sich teilweise große Differenzen.

<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>								
Deutschland				Frankreich			USA	
R&D (n=1)	Marketing (n=0)	Verfahrenstechnik (n=3)	Gesamt (n=4)	R&D (n=2)	Marketing (n=0)	Gesamt (n=2)	Weniger erfolgreich (n=1)	Erfolgreich (n=2)
4,0	-	2,8	3,1	3,1	-	3,1	3,0	2,3
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>								
Deutschland			Frankreich			USA		
R&D (n=2)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=3)	R&D (n=0)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=1)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
2,4	3,0	2,6	-	4,0	4,0	3,5	2,8	3,1

**Tabelle 41: Beurteilung der kommerziellen Bewertung im Projektverlauf**

Die erfolgreichste Innovation, die der deutschen IR-Projekte, wurde hinsichtlich der Multifunktionalität der Prozess-Teams interessanterweise schlechter beurteilt als das weniger erfolgreiche US-amerikanische IR-Projekt (siehe Tabelle 42). Die Multifunktionalität der Prozess-Teams scheint somit in den untersuchten Projekten eine nur untergeordnete Rolle zu spielen.

<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>								
<u>Deutschland</u>				<u>Frankreich</u>			<u>USA</u>	
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Verfahrenstechnik (n=5)	Gesamt (n=7)	R&D (n=2)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=3)	Weniger erfolgreich (n=2)	Erfolgreich (n=2)
2,0	2,7	1,9	2,0	2,3	3,0	2,6	1,5	2,2
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>								
<u>Deutschland</u>			<u>Frankreich</u>			<u>USA</u>		
R&D (n=2)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=3)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
3,2	2,5	2,8	2,0	2,7	2,3	2,0	2,0	2,0

**Tabelle 42: Bewertung der Multifunktionalität der Prozess-Teams**

Auch bezüglich des Einsatzes und des Engagements des Projektleiters und der Teammitglieder wurden die deutschen IR-Projekte, wie in Tabelle 43 ersichtlich, schlechter eingeschätzt als das weniger erfolgreiche US-amerikanische IR-Projekt. Der Einsatz und das Engagement des Projektleiters und der Teammitglieder sind damit eher unbedeutend als Erfolgsfaktor.

Wie ebenfalls aus Tabelle 43 ablesbar, existieren zwischen den Aussagen der unterschiedlichen funktionalen Bereiche teilweise große Divergenzen (Deutschland IR (Verfahrenstechnik 1,9; Marketing 2,7); Deutschland NIR (R&D 3,2; Marketing 2,5); Frankreich IR( R&D 2,0; Marketing 3,0) und Frankreich NIR (R&D 2,0; Marketing 2,7)).

<b>Alt-Innovation „IR-Technologie“</b>								
<u>Deutschland</u>				<u>Frankreich</u>			<u>USA</u>	
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Verfahrenstechnik (n=5)	Gesamt (n=7)	R&D (n=2)	Marketing (n=0)	Gesamt (n=2)	Wenig erfolgreich (n=2)	Erfolgreich (n=1)
1,9	2,6	2,2	2,2	2,5	-	2,5	1,2	2,3
<b>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</b>								
<u>Deutschland</u>			<u>Frankreich</u>			<u>USA</u>		
R&D (n=2)	Marketing (n=2)	Gesamt (n=4)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
2,8	2,5	2,7	1,0	2,0	1,5	2,7	2,0	2,4

**Tabelle 43: Bewertung des Einsatzes und des Engagements des Projektleiters und der Teammitglieder**

In Bezug auf die Kommunikation und die Unternehmensleitung wurde interessanterweise das weniger erfolgreiche US-amerikanische IR-Projekt als am besten eingestuft (siehe Tabelle 44 bis Tabelle 45). Diese beiden Faktoren stellen somit auch keine wichtigen Erfolgsfaktoren für die untersuchten Projekte dar.

Dass der Einsatz und das Engagement sowie die Kommunikation und die Unternehmensleitung des weniger erfolgreichen US-amerikanischen besser eingestuft wurden

als die der erfolgreichen deutschen IR-Projekte, ist wiederum erstaunlich. Auch hier könnten in weiteren Forschungsarbeiten außenstehende Personen, die in das weniger erfolgreiche US-amerikanische Projekt involviert waren, befragt werden, um die erhaltenen Befunde zu überprüfen bzw. zu widerlegen.

<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>								
Deutschland				Frankreich			USA	
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Verfahrenstechnik (n=5)	Gesamt (n=7)	R&D (n=2)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=3)	Wenig erfolgreich (n=2)	Erfolgreich (n=2)
1,5	2,8	2,1	2,1	2,4	2,0	2,3	1,5	1,9
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>								
Deutschland			Frankreich			USA		
R&D (n=2)	Marketing (n=2)	Gesamt (n=4)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
2,1	2,4	2,3	1,5	2,0	1,8	2,8	2,0	2,4

**Tabelle 44: Bewertung der Kommunikation**

<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>								
Deutschland				Frankreich			USA	
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Verfahrenstechnik (n=4)	Gesamt (n=6)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	Wenig erfolgreich (n=2)	Erfolgreich (n=1)
2,3	2,5	3,2	2,9	3,8	2,8	3,3	2,3	2,8
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>								
Deutschland			Frankreich			USA		
R&D (n=2)	Marketing (n=2)	Gesamt (n=4)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
2,3	3,5	2,9	2,0	3,0	2,5	2,5	4,0	3,3

**Tabelle 45: Bewertung der Unternehmensleitung**

Bei der Ressourcenausstattung gilt ähnliches. Das weniger erfolgreiche US-IR-Projekt sowie die erfolgreichen US-IR-Projekte wurden, wie in Tabelle 46 dargestellt, am besten hinsichtlich der Ressourcenausstattung eingeschätzt.

<b>Alt-Innovation „IR-Technologie“</b>								
Deutschland				Frankreich			USA	
R&D (n=2)	Marketing (n=0)	Verfahrenstechnik (n=4)	Gesamt (n=7)	R&D (n=2)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=3)	Wenig erfolgreich (n=2)	Erfolgreich (n=1)
2,0	-	2,2	2,2	2,8	2,7	2,8	1,8	1,8
<b>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</b>								
Deutschland			Frankreich			USA		
R&D (n=2)	Marketing (n=2)	Gesamt (n=4)	R&D (n=0)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)
3,3	3,3	3,3	-	2,7	2,7	2,3	2,0	2,2

**Tabelle 46: Bewertung der Ressourcenausstattung**

Die Hypothese 3 geht von ähnlichen internen Erfolgsfaktoren wie Ressourcenausstattung für IR- und NIR-Technologie aus. Als bedeutender interner Erfolgsfaktor wurde der „formale Prozess“ ermittelt. Ein Vergleich der Werte des „formalen Prozesses“ der Tabelle 39 zeigt, dass die Hypothese 3 nur für Frankreich bejaht werden kann, für Deutschland und USA muss sie abgelehnt werden.

#### 6.3.4 Prozesssteuerung (Entscheidungen zum Projekt-Abbruch, zur Projekt-Weiterführung oder zur Projekt-Änderung)

In Deutschland wurden hinsichtlich der Prozesssteuerung drei von den Interviewpartner benannte IR-Projekte des Flüssiglack-Bereichs bewertet<sup>19</sup>. Das Projekt „Einsatz eines Klarlacks für Kunststoffe auf KTL-Blechen im Gesamtaufbau als Reparaturklarlack mittels IR-Trocknung“ wurde bereits nach den technischen Machbarkeitsstudien abgebrochen. Bei diesen technischen Machbarkeitsstudien wurden IR-Trocknungsversuche mit kurz- und mittelwelliger IR-Strahlung durchgeführt. Die kurzwellige IR-Strahlung bewirkte eine starke Blasenbildung des Flüssiglacks. Der mittels mittelwelliger IR-Strahlung ausgehärtete Lack war optisch in Ordnung, das

<sup>19</sup> Wie bereits unter 6.1 erwähnt, erfolgte die Befragung zur Prozesssteuerung in offener Form.

Lacksystem war aber für den Einsatzzweck ungeeignet (zu weich, schlechte Polierbarkeit).

Das Projekt „IR-Trocknung von Flüssiglacken auf stark dreidimensional konturierten Kunststoff-Formteilen“ wurde ebenfalls nach den technischen Machbarkeitsstudien abgebrochen. Es ergaben sich bei den ersten technischen Machbarkeitsstudien Formteildeformationen und Kocherscheinungen im Lack.

Als Ursachen wurden erstens die großen Unterschiede in der Energieaufnahme der einzelnen Teilzonen angegeben und zweitens die schlechten Wärmeleitungseigenschaften des Kunststoffs, und somit keine Möglichkeit des Temperatur-Ausgleichs durch Wärmeleitung oder der Ableitung von Überhitzungen.

Das dritte deutsche in dieser Arbeit hinsichtlich Prozesssteuerung untersuchte Projekt ist das Projekt „IR-Bogen für Karosserie-Reparatur“. Dieses wurde erst nach der Installation des IR-Portals abgebrochen. Der angegebene Grund für den Abbruch lautet, dass das IR-Portal zu aufwendig und der Stromverbrauch zu hoch ist.

In den USA wurde das weniger erfolgreiche IR-Projekt des Flüssiglack-OEM-Bereichs in Bezug auf Prozesssteuerung ausgewertet. Das zuerst gesetzte Projekt-Ziel war die Anwendung von Infrarot-Strahlen zur Flüssiglack-Aushärtung. Die chemisch-technischen Machbarkeitsstudien ergaben, dass das Projektziel chemisch-technisch nicht machbar ist. Es folgten trotzdem noch Versuchsreihen beim Kunden im Werk. Diese Versuche waren erfolglos. Nach den negativ verlaufenen chemisch-technischen Machbarkeitsstudien und den erfolglosen Versuchen beim Kunden wurde die Entscheidung getroffen, dass Projekt nicht abubrechen, sondern das Projektziel zu ändern. Das neue Projektziel war, dass der Kunde in seiner Anlage die Infrarotstrahlen zur Entfernung des Wassers aus dem Wasserlack verwendet und die eigentliche Aushärtung mit einer alternativen Wärmequelle vollzieht. In dieser Form wurde das Projekt vom Kunden umgesetzt.

Wie anhand dieser Daten deutlich wird, erfolgt eine Entscheidung zum Projekt-Abbruch meist sehr spät oder gar nicht.

*Innovationsgrad der untersuchten Lack-Innovationen*

Der Alt-Innovation „IR-Technologie“ wurde in Deutschland der höchste Innovationsgrad zugeordnet (siehe Tabelle 47 bis Tabelle 49). Da die deutschen IR-Projekte die erfolgreichsten hier untersuchten sind, stellt der Innovationsgrad somit einen wichtigen Erfolgsfaktor dar.

<b><u>Deutschland</u></b>							
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>							
DuPont				Strahler-Hersteller			
R&D (n=1)	Marketing (n=2)	Verfahrens- technik (n=5)	Gesamt (n=8)	Hersteller 1 (n=2)	Hersteller 2 (n=3)	Hersteller 3 (n=2)	Gesamt (n=7)
3,3	2,3	2,8	2,8	2,7	2,3	3,0	2,6
Mittelwert gesamt (IR) (n=15)							
2,7							
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>							
DuPont				Strahler-Hersteller			
R&D (n=2)		Marketing (n=2)	Gesamt (n=4)	Hersteller 1 (n=0)		Gesamt (n=0)	
2,2		2,0	2,1	-		-	
Mittelwert gesamt (NIR) (n=4)							
2,1							

**Tabelle 47: Bewertung des Innovationsgrades (Deutschland)**

<b><u>Frankreich</u></b>		
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>		
<u>DuPont</u>		
R&D (n=2)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=3)
2,8	4,0	3,2
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>		
<u>DuPont</u>		
R&D (n=0)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=1)
-	3,0	3,0

**Tabelle 48: Bewertung des Innovationsgrades (Frankreich)**

<b><u>USA</u></b>				
<b><u>Alt-Innovation „IR-Technologie“</u></b>				
<u>DuPont</u>				
Wenig erfolgreich (n=0)		Erfolgreich (n=1)		Gesamt (n=1)
-		4,0		4,0
<b><u>Neu-Innovation „NIR-Technologie“</u></b>				
DuPont			Strahler-Hersteller	
R&D (n=1)	Marketing (n=1)	Gesamt (n=2)	Hersteller 1(n=1)	Gesamt (n=1)
2,7	3,7	3,2	3,3	3,3
Mittelwert gesamt (NIR) (n=3)				
3,2				

**Tabelle 49: Bewertung des Innovationsgrades (USA)**

Die Hypothese 4, die von einem ähnlichen Innovationsgrad für NIR- und IR-Technologie ausgeht, kann nur für Frankreich bestätigt werden, für die anderen beiden Länder muss sie abgelehnt werden (vergleiche Tabelle 47 bis Tabelle 49).

### *6.3.7 Patentrechtliche Absicherung der Technologien durch die US-amerikanische Firma DuPont*

Die Abgrenzung von den Wettbewerbern durch Patente ist gemäß der in dieser Arbeit angestellten Untersuchungen weitestgehend unabhängig vom Land (Deutschland, Frankreich, USA). Und somit auch unabhängig vom Erfolg der untersuchten, unter-

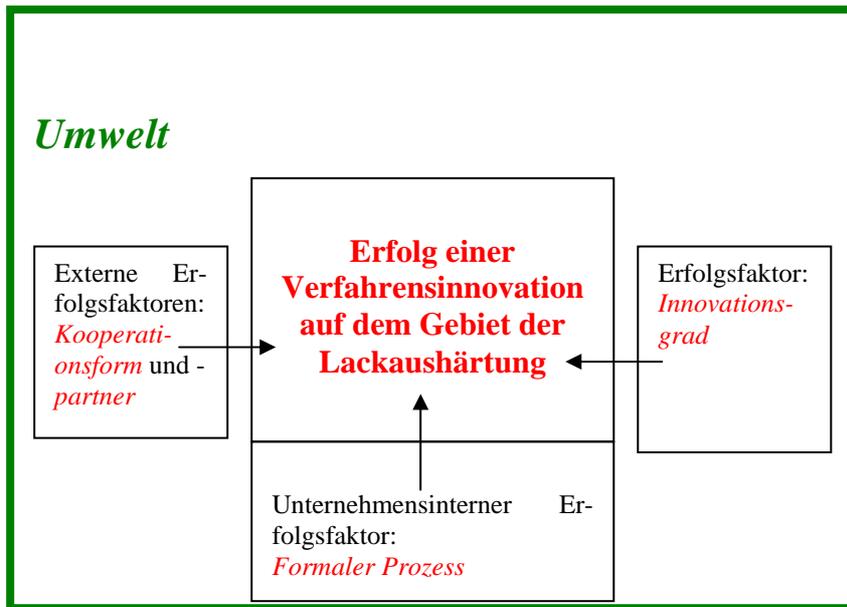
schiedlich erfolgreichen Projekte, so dass die patentrechtliche Absicherung bei den hier untersuchten Projekten nicht als wichtiger Erfolgsfaktor gilt.

Demgegenüber ist ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Technologie feststellbar. Die Firma DuPont hält ca. 70% aller Patente bezüglich der NIR-Aushärtung in den untersuchten Ländern, aber nur ungefähr 20% aller Patente in Bezug auf die IR-Aushärtung von Lacken.

Da somit die Firma DuPont über die Hälfte der Patente hinsichtlich der NIR-Aushärtung von Lacken innehält, kann von einer guten patentrechtlichen Absicherung der NIR-härtbaren Lacke ausgegangen werden. Jedoch kann das mangelnde Interesse der anderen Firmen an der NIR-Technologie auch bedeuten, dass diese sie für zu unbedeutend halten, um sie patentrechtlich schützen zu wollen.

#### *6.3.8 Erfolgsfaktoren und Umweltfaktoren einer Verfahrensinnovation auf dem Gebiet der Lackaushärtung*

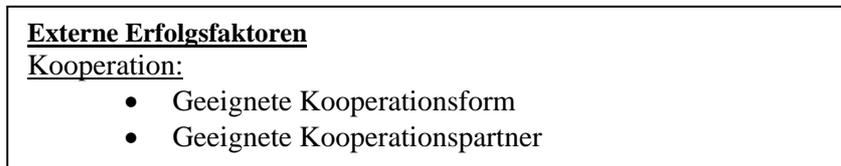
Im Rahmen dieser Arbeit wurden Kooperationsform, Kooperationspartner, formaler Prozess und Innovationsgrad als wichtige Erfolgsfaktoren ermittelt. Es ergibt sich daher das in Abbildung 41 dargestellte Schema der Beeinflussung des Erfolgs einer Verfahrensinnovation im Lackaushärtungsbereich.



**Abbildung 41: Erfolgs- und Umweltfaktoren einer Verfahrensinnovation auf dem Gebiet der Lackaushärtung**

Sind die Ausprägungen von zwei Variablen ähnlich, so werden diese zu einer gemeinsamen Variablen verdichtet.

Die beiden Variablen des Erfolgsfaktors Kooperation werden nicht verdichtet. Somit ergeben sich die in Abbildung 42 zusammengestellten Variablen der externen Erfolgsfaktoren.



**Abbildung 42: Die Variablen der externen Erfolgsfaktoren**

Hinsichtlich der Erfolgsfaktoren „Formaler Prozess“ und „Innovationsgrad“ wird ebenfalls keine Verdichtung von Variablen vorgenommen. Es resultieren damit die in Abbildung 43 ersichtlichen Variablen.

<p><b><u>Erfolgsfaktoren innerhalb des Konzerns:</u></b>  Formaler Prozess:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Klare Einteilung in Phasen</li> <li>• Klar vorgegebene Meilensteine</li> <li>• Optimale Steuerung des Prozesses</li> <li>• Klare Kriterien für die Projektdurchführung bzw. den Projektabbruch</li> </ul>
<p><b><u>Innovationsgrad:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Basis-Innovation</li> <li>• Nicht-inkrementale Innovation</li> <li>• Revoltutionäre Innovation</li> </ul>

**Abbildung 43: Die Variablen der Erfolgsfaktoren „Formaler Prozess“ und „Innovationsgrad“**

Hinsichtlich der Wettbewerbsintensität werden die beiden Variablen „Harter Preiswettbewerb“ und „Starker Wettbewerb in der Branche“ zur Variablen „Starker Wettbewerb in der Branche mit hartem Preiswettbewerb“ verdichtet. Die beiden Variablen „Vorhersage fast unmöglich“ und „Sehr schnelle Veränderungen der Technologien“ des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ werden zur einer Variablen „Sehr schnelle Veränderungen der Technologien mit fast unmöglichen Vorhersagen“ vereint.

In

Abbildung 44 sind die Kontingenzfaktoren des deutschen, französischen und US-amerikanischen Lackmarktes in verdichteter Form zusammengefasst.

<p><b><u>Umweltfaktoren:</u></b></p> <p><b><u>Marktdynamik:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fast keine langjährigen Kunden</li> <li>• Neue Kunden mit neuartigen Produkthanforderungen</li> <li>• Nachfragen von neuen Kunden</li> <li>• Fortwährender Kundenwunsch nach Neuprodukten</li> <li>• Starke Veränderung der Kundenanforderungen</li> </ul> <p><b><u>Wettbewerbsdynamik:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Starker Wettbewerb in der Branche mit hartem Preiswettbewerb</li> <li>• Sehr starke Wettbewerber</li> <li>• Neue Aktivitäten des Wettbewerbs</li> <li>• Sofortiges Produkt-Angebot vom Wettbewerb</li> </ul> <p><b><u>Technologiedynamik:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sehr schnelle Veränderungen der Technologien mit fast unmöglichen Vorhersagen</li> <li>• Häufig wichtige technologische Veränderungen</li> <li>• Meist Neuprodukte durch „Durchbrüche“</li> <li>• Veränderungen eröffnen große Chancen</li> </ul>
--

**Abbildung 44: Die Kontingenzzfaktoren<sup>20</sup> des deutschen, französischen und US-amerikanischen Lackmarktes in verdichteter Form**

---

<sup>20</sup> In Bezug auf die Marktdynamik konnte keine sinnvolle Verdichtung von Variablen erfolgen.

## **7 Implikationen für Wissenschaft und Unternehmenspraxis**

### **7.1 Implikationen für die Wissenschaft**

Die hier erhaltenen Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit, Personen verschiedener funktionaler Bereiche in Untersuchungen einzubeziehen.

Innerhalb eines Untersuchungskomplexes bestehen teilweise große Differenzen zwischen den Aussagen der verschiedenen funktionalen Bereichen.

Daher ist ein Nachteil dieser Arbeit, dass nicht zu jeder Untersuchungseinheit Personen verschiedener funktionaler Bereiche befragt werden konnten bzw. nicht zu jeder Untersuchungseinheit Aussagen der verschiedenen funktionalen Bereiche vorliegen.

Ein weiterer Befund dieser Arbeit ist, dass hinsichtlich der untersuchten Faktoren zum Teil große Unterschiede in Abhängigkeit von den deutschen, französischen bzw. US-amerikanischen Projekten auftreten. In Untersuchungen zu Verfahrensinnovationen sollten daher länderspezifische Unterschiede beachtet werden.

### **7.2 Implikationen für die Unternehmenspraxis**

Laut Balachandra/Brockhoff/Pearson kann die Entscheidung ein Projekt zu beenden, den Projekt-Manager und die Team-Mitglieder demoralisieren und die Besorgnis um die Job-Sicherheit vergrößern. Aus diesen Gründen neigen Manager zu verspäteten Abbruch-Entscheidungen [70].

Dieser Befund wurde auch im Rahmen dieser Arbeit bestätigt.

Das deutsche IR-Projekt „IR-Bogen für Karosserie-Reparatur“ wurde erst nach der Installation des IR-Portals d.h. sehr verspätet beendet

Hinsichtlich des weniger erfolgreichen US-amerikanischen IR-Projektes ergaben die chemisch-technischen Machbarkeitsstudien, dass das Projektziel chemisch-technisch

nicht machbar ist. Es folgten trotzdem noch Versuchsreihen beim Kunden im Werk. Diese Versuche brachten nicht die gewünschten Ergebnisse. Nach den negativ verlaufenen chemisch-technischen Machbarkeitsstudien und den erfolglosen Versuchen beim Kunden wurde die Entscheidung getroffen, dass Projekt nicht abubrechen, sondern das Projektziel zu ändern. Die eigentlich erforderliche Abbruch-Entscheidung wurde somit nicht getroffen.

Als wichtiger Erfolgsfaktor für Verfahrensinnovationen im Lackaushärtungsbereich wurde im Rahmen dieser Arbeit der formale Prozess ermittelt.

Der formale Prozess wird bei allen drei Untersuchungseinheiten der Neu-Innovation „NIR-Technologie im Pulverlackbereich“ schlechter beurteilt als bei der erfolgreichen Alt-Innovation „IR-Technologie im Flüssiglackbereich in Deutschland“. Demzufolge ist zu erwarten, dass die „NIR-Technologie im Pulverlackbereich“ bei Beibehaltung des aktuellen formalen Prozesses hinsichtlich des formalen Prozesses weniger erfolgreich ist als die „IR-Technologie im Flüssiglackbereich in Deutschland“.

Die weiteren bedeutenden Erfolgsfaktoren für Verfahrensinnovationen auf dem Gebiet der Lackaushärtung sind gemäß dieser Untersuchungen Kooperationsform, Kooperationspartner sowie Innovationsgrad.

Prinzipiell sind in Deutschland, in Frankreich und in den USA die Kooperationen mit den Strahler-Herstellern in Abhängigkeit von der Technologie ähnlich aufgebaut. Bezüglich der IR-Projekte arbeitet DuPont mit mehreren Strahler-Herstellern in eher loser nicht-vertraglicher Form zusammen. Die Kooperation der NIR-Projekte besteht hingegen aus der Zusammenarbeit mit nur einem einzigen Strahler-Hersteller unter vertraglicher Festlegung der Kooperationsziele.

Der Erfolgsfaktor Kooperation wird hinsichtlich „NIR-Technologie“ schlechter eingeschätzt als bei der Alt-Innovation „IR-Technologie“. Der Erfolgsfaktor Kooperation wird somit, falls sich Kooperationsform- und Kooperationspartner nicht verändern, die Projekte der „NIR-Technologie“ negativ beeinflussen.

Der Innovationsgrad wird bei der „NIR-Technologie in Deutschland“ höher eingestuft als bei der „IR-Technologie in Deutschland“. Der Innovationsgrad hat daher auf den Erfolg der deutschen NIR-Projekte einen positiven Effekt.

Um die hier aufgestellten Prognosen zu überprüfen, sollte die Neu-Innovation zu einem späteren Zeitpunkt nochmals analysiert und bewertet werden.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

### **8.1 Zusammenfassung**

In der vorliegenden Arbeit wird erstmals eine Verfahrensinnovation im Lackbereich parallel sowohl aus lackchemischer als auch aus Innovationsmanagement-Sicht beschrieben. Zu diesem Zweck sollte einerseits geklärt werden, ob die NIR-Strahlung als Aushärtungsmethode auf dem Gebiet der Pulverlacke eingesetzt werden kann. Andererseits sollten die Erfolgs- und Umweltfaktoren im Lackbereich einer internationalen Firma in Frankreich, Deutschland und in den USA bestimmt werden.

Die Anwendung von NIR-Strahlen im Pulverlackbereich bedarf geeignet beschleunigter Pulverlacksysteme sowie NIR-gehärteten Lacke, die die gleichen Eigenschaften aufweisen wie konventionell gehärtete Lacke.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten für die NIR-Aushärtung geeignete, beschleunigte Pulverlacksysteme auf Hybrid-Basis entwickelt werden.

Außerdem wurde geprüft, ob die NIR gehärteten und die konventionell gehärteten Pulverlacke dieselben lackchemischen Eigenschaften aufweisen. Zu diesem Zweck wurden DSC-, DMA- und IR-Messungen durchgeführt. Die mittels dieser Messungen erhaltenen Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die NIR Strahlung als Aushärtungsmethode für Pulverlacke keinen negativen Einfluss auf die Eigenschaften des gebildeten Lacks hat.

Zur Bestimmung der Umweltfaktoren Markt- und Technologiedynamik sowie Wettbewerbsintensität in Frankreich, Deutschland und in den USA wurde eine empirische Studie im Lackbereich der internationalen Firma DuPont sowie deren Kooperationspartner durchgeführt. Die Studie ergab, dass die Technologiedynamik und Wettbewerbsintensität in den USA, in Deutschland und in Frankreich sowie die Marktdynamik in den USA und in Deutschland als leicht dynamisch bzw. leicht intensiv angesehen werden. Die Marktdynamik in Frankreich wird als weder dynamisch noch als starr eingestuft.

Des Weiteren wurden durch die empirische Studie die Erfolgsfaktoren von Verfahrensinnovationen auf dem Gebiet der Lackaushärtung ermittelt. Die Erfolgsfaktoren von Verfahrensinnovationen auf dem Gebiet der Lackaushärtung sind nach diesen Untersuchungen „Formaler Prozess“, „Kooperationsform“ und „Kooperationspartner“ sowie „Innovationsgrad“.

## 8.2 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnten keine Unterschiede zwischen den thermisch ausgehärteten und zwischen den jeweiligen mittels NIR-Emittern ausgehärteten Lacken festgestellt werden, die möglicherweise gegen Verwendung von NIR-Emittern zur Aushärtung von Pulverlacken sprechen würden. In zukünftigen Arbeiten sollten noch mehr verschiedene Pulverlack-Systeme untersucht werden, um die erhaltenen Ergebnisse zu untermauern.

Auf dem Gebiet der Beschleuniger sollten in zukünftigen Arbeiten der Einsatz der hier in einem Hybrid-Pulverlacksystem untersuchten Beschleuniger auch in anderen Pulverlacksystemen examiniert werden.

Verfahrensinnovationen sind bisher selten untersucht worden. Um die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Verfahrens-Innovations-Erfolgsfaktoren Kooperationsform, Kooperationspartner, formaler Prozess und Innovationsgrad zu bestätigen, sollten weitere empirische Studien von Verfahrensinnovationen folgen.

Außerdem sollte die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Neu-Innovation, zu einem späteren Zeitpunkt nochmals untersucht werden. Die Neu-Innovation befand sich zum Zeitpunkt der Untersuchung erst in der Einführungsphase des Produktlebenszyklus, somit konnte noch keine Aussage zum Erfolg der Innovation getroffen werden. Eine abschließende Bewertung der Erfolgsfaktoren hinsichtlich Neu-Innovation ist aber erst bei Kenntnis des Erfolgsgrades möglich.

## 9 Anhang

### 9.1 Beschleunigung der Epoxy-Carboxy-Reaktion in NIR- Pulverlacksystemen

#### 9.1.1 Gelzeitmessungen

Proben-Name	Beschleuniger	Stoff- menge Beschleu- niger [mol]	Gelzeit bei 185°C [s] 1. Messung	Gelzeit bei 185°C [s] 2. Messung	Gelzeit bei 185°C [s] 3. Messung	Gelzeit bei 185°C [s] Mittel- wert
F58-1	-		193	192	194	192
F58-2	Beschleuniger A	0,0005	156	157	156	156,333
F58-3	Beschleuniger A	0,001	127	127	125	126,333
F58-4	Beschleuniger A	0,0025	79	77	78	78,000
F58-5	Beschleuniger B	0,0005	131	132	131	131,333
F58-6	Beschleuniger B	0,001	97	95	96	96,000
F58-7	Beschleuniger B	0,0025	60	59	60	59,667
F58-8	Beschleuniger C	0,0005	150	149	149	149,333
F58-9	Beschleuniger C	0,001	120	120	121	120,333
F58-10	Beschleuniger C	0,0025	73	74	76	74,333
F58-11	Beschleuniger D	0,0005	135	135	134	134,667
F58-12	Beschleuniger D	0,001	109	107	107	107,667
F58-13	Beschleuniger D	0,0025	65	65	66	65,333

**Tabelle 50: Einzel-Ergebnisse der Gelzeitmessungen von NIR-Pulvern mit unterschiedlichen Phosphonium-Beschleunigern bei 185°C**

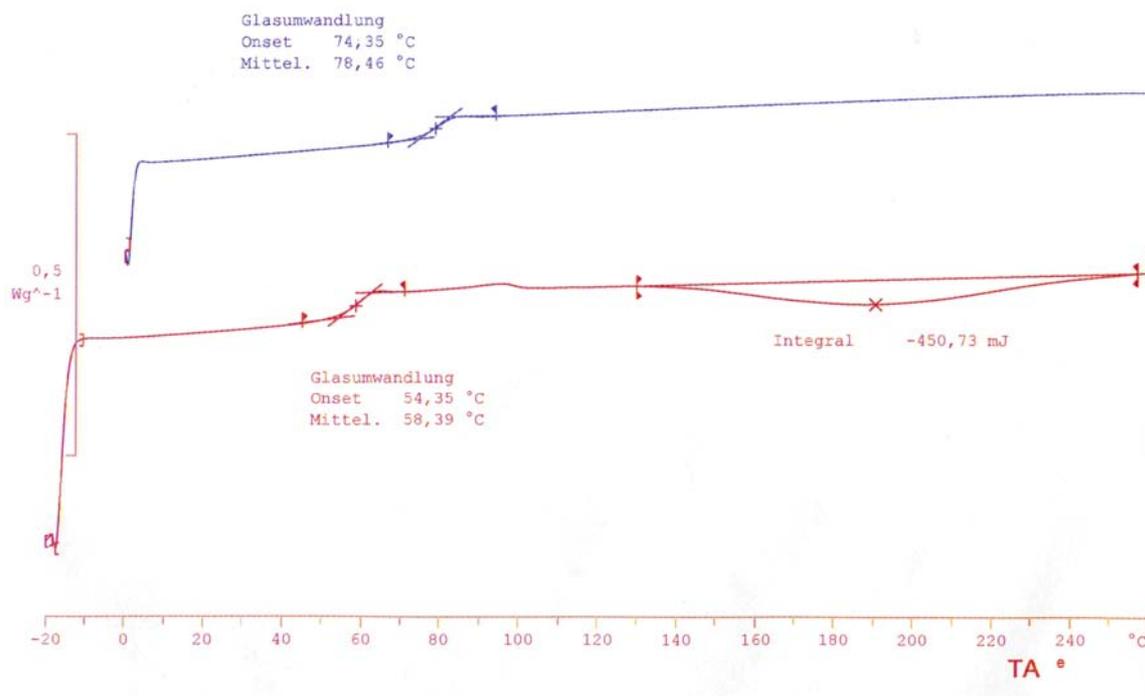
Proben-Name	Beschleuniger	Stoff- menge Beschleu- niger [mol]	Gelzeit bei 185°C [s] 1. Messung	Gelzeit bei 185°C [s] 2. Messung	Gelzeit bei 185°C [s] 3. Messung	Gelzeit bei 185°C [s] Mittel- wert
F58-1	-	-	95	95	96	95,333
F58-2	Beschleuniger A	0,0005	75	75	76	75,333
F58-3	Beschleuniger A	0,001	55	53	54	54
F58-4	Beschleuniger A	0,0025	35	35	36	35,333
F58-5	Beschleuniger B	0,0005	56	57	56	56,333
F58-6	Beschleuniger B	0,001	41	42	40	41
F58-7	Beschleuniger B	0,0025	25	24	25	24,667
F58-8	Beschleuniger C	0,0005	69	68	68	68,333
F58-9	Beschleuniger C	0,001	48	47	48	47,667
F58-10	Beschleuniger C	0,0025	31	29	29	29,667
F58-11	Beschleuniger D	0,0005	59	60	60	59,667
F58-12	Beschleuniger D	0,001	45	44	44	44,333
F58-13	Beschleuniger D	0,0025	29	28	29	28,667

**Tabelle 51: Einzel-Ergebnisse der Gelzeitmessungen von NIR-Pulvern mit unterschiedlichen Phosphonium-Beschleunigern bei 215°C**

### 9.1.2 Bestimmung der Reaktionsenthalpien

Proben-Name	Beschleuniger	Glasübergangstemperatur [°C] 1. Durchlauf	Reaktionsenthalpie [mJ]	Ein-gewogene Menge [mg]	Reaktionsenthalpie [J/g]	Glasübergangstemperatur [°C] 2. Durchlauf
F58- 1		58,39	-450,73	30,75	-14,66	78,46
F58- 2	Beschleuniger A	57,87	-427,13	22,51	-18,98	79,56
F58- 3	Beschleuniger A	56,99	-709,33	32,85	-21,59	78,84
F58- 4	Beschleuniger A	59,83	-570,93	23,79	-24	79,10
F58- 5	Beschleuniger B	56,95	-438,68	22,57	-19,44	79,29
F58- 6	Beschleuniger B	58,96	-413,94	17,45	-23,72	80,57
F58- 7	Beschleuniger B	60,11	-200,14	7,69	-26,03	82,07
F58- 8	Beschleuniger C	58,27	-398,23	20,84	-19,11	79,45
F58- 9	Beschleuniger C	59,34	-575,6	25,96	-22,17	79,80
F58- 10	Beschleuniger C	59,40	-510,43	21,06	-24,34	79,76
F58- 11	Beschleuniger D	59,07	-553,68	28,68	-19,31	77,97
F58- 12	Beschleuniger D	59,00	-695,56	29,72	-23,4	79,92
F58- 13	Beschleuniger D	57,92	-612,39	24,18	-25,33	79,11

**Tabelle 52: Bestimmung der Reaktionsenthalpien der Pulver mit verschiedenen Beschleunigern**



**Abbildung 45: DSC-Aufnahme F58-1, Pulver**

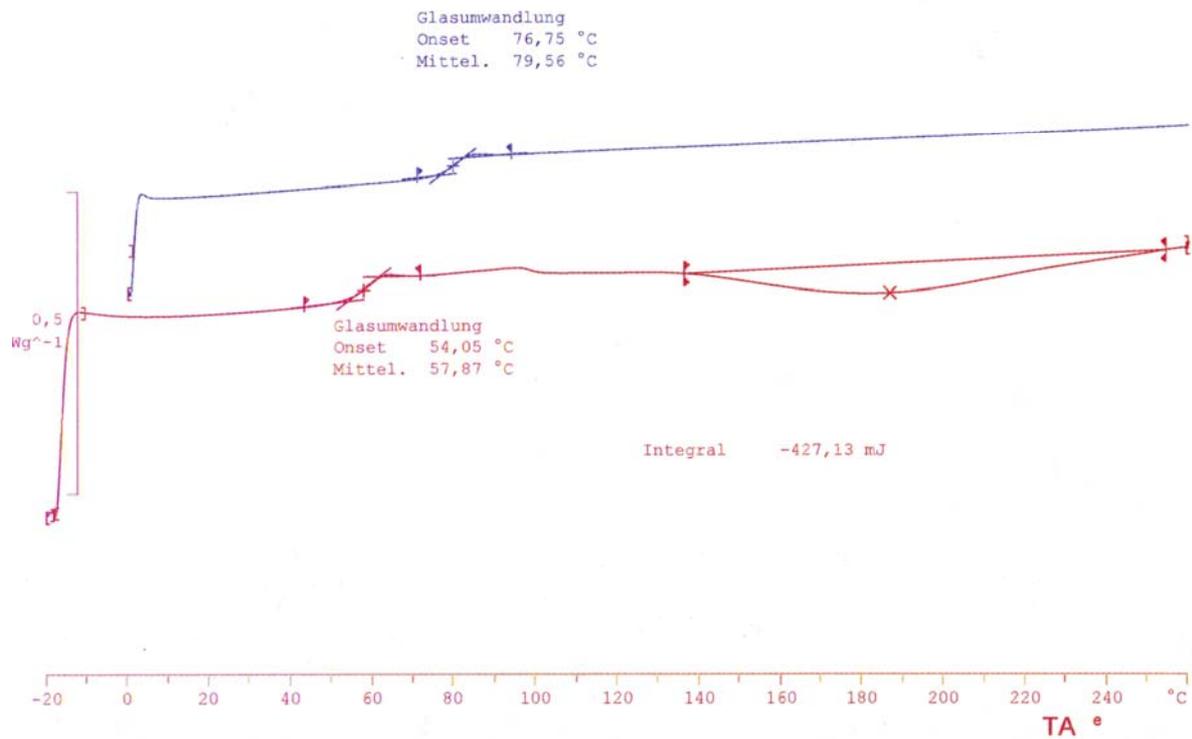


Abbildung 46: DSC-Aufnahme F58-2, Pulver

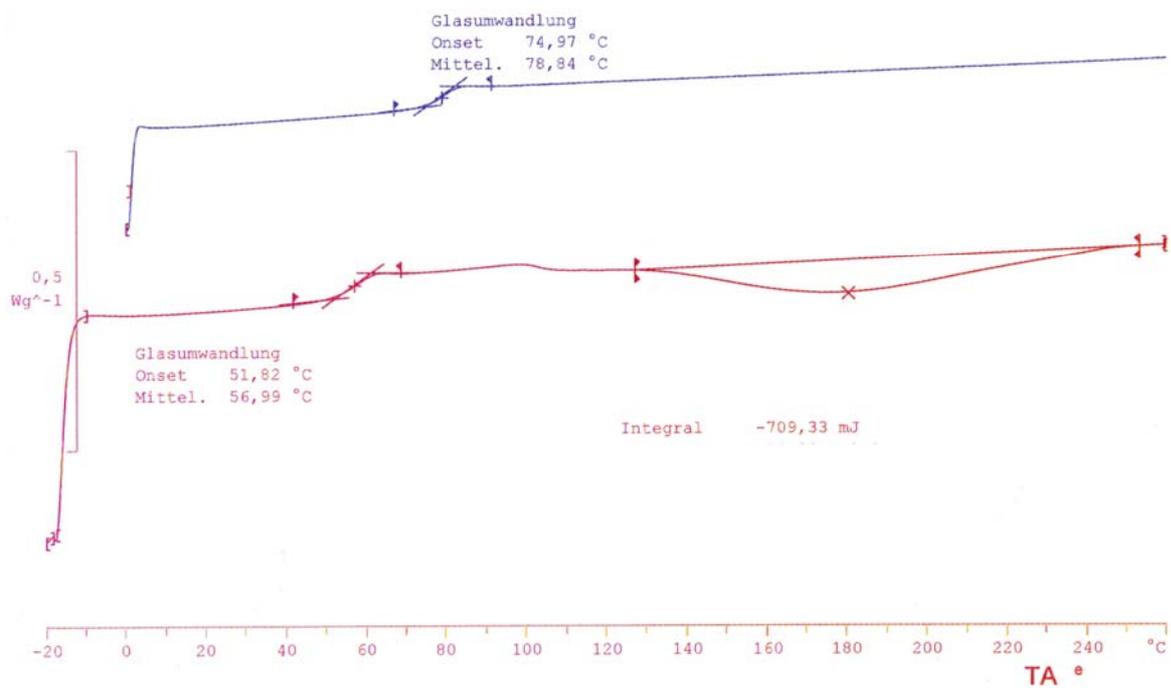


Abbildung 47: DSC-Aufnahme F58-3, Pulver

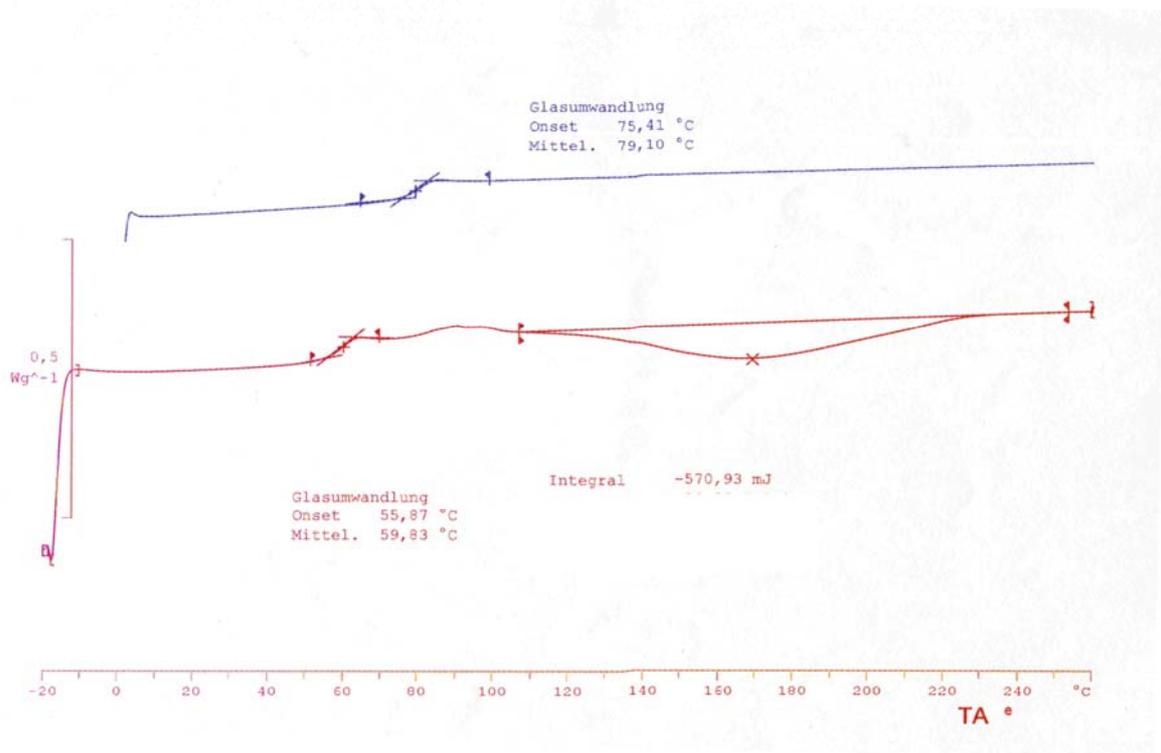


Abbildung 48: DSC-Aufnahme F58-4, Pulver

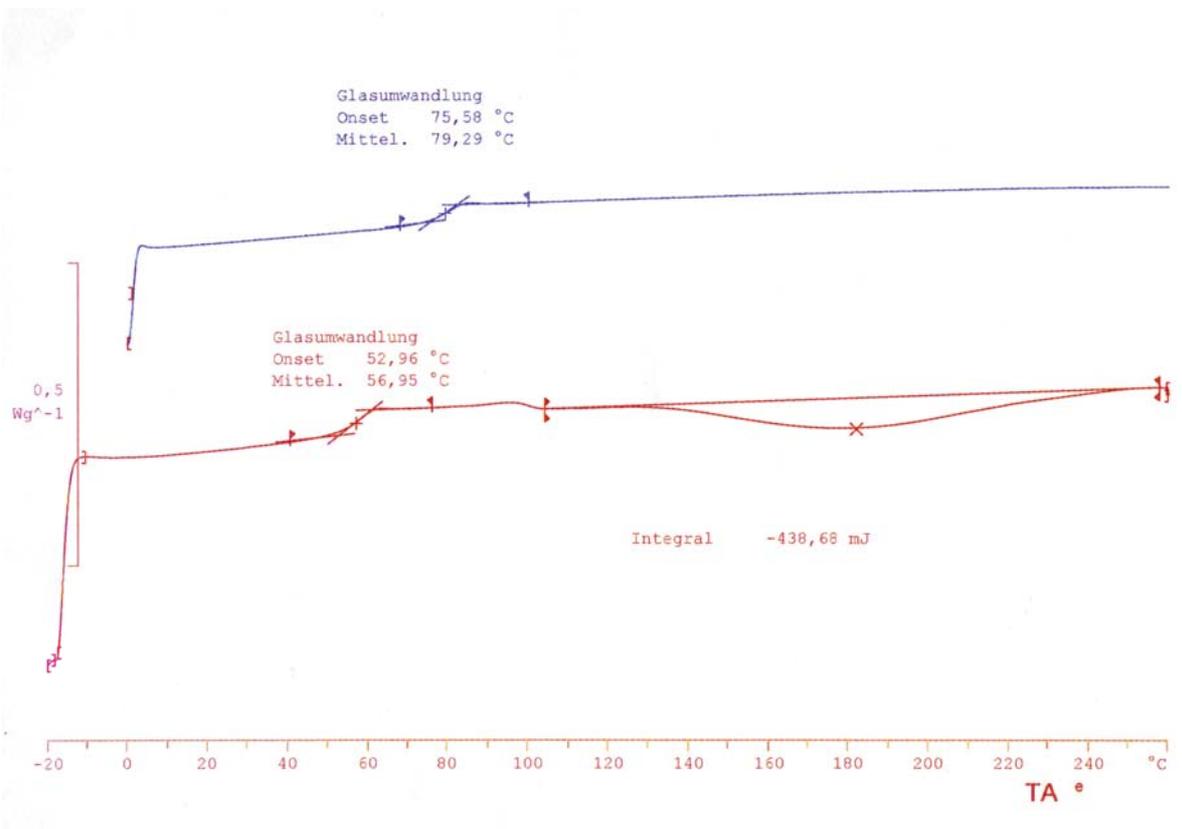


Abbildung 49: DSC-Aufnahme F58-5, Pulver

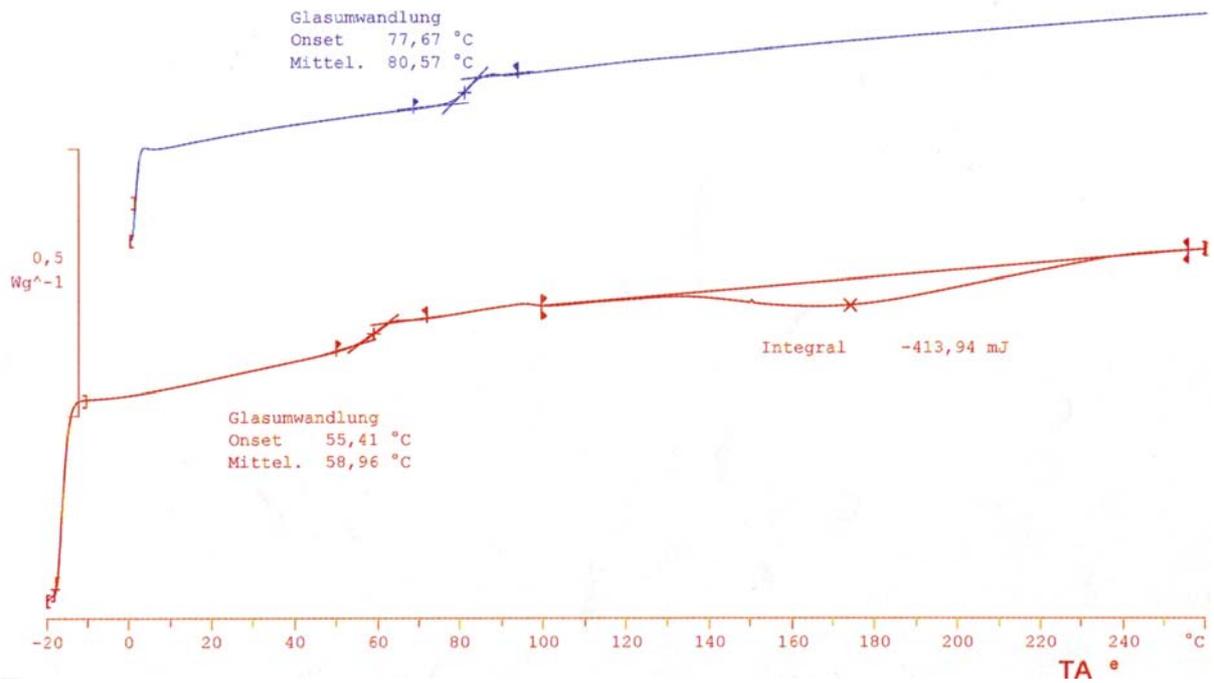


Abbildung 50: DSC-Aufnahme F58-6, Pulver

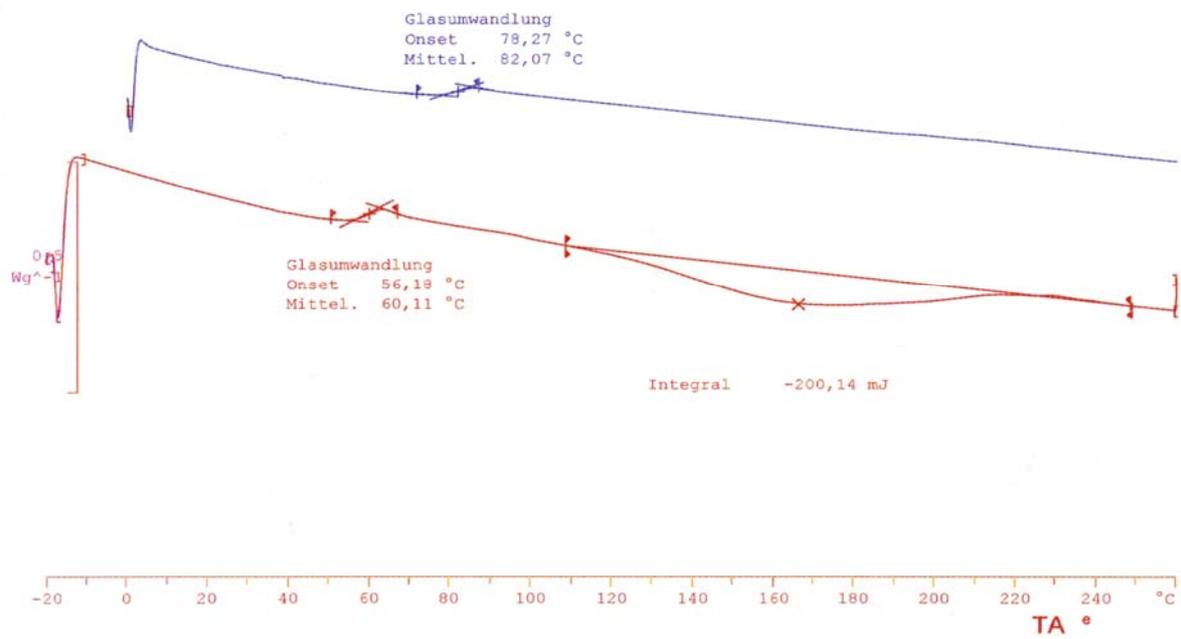


Abbildung 51: DSC-Aufnahme F58-7, Pulver

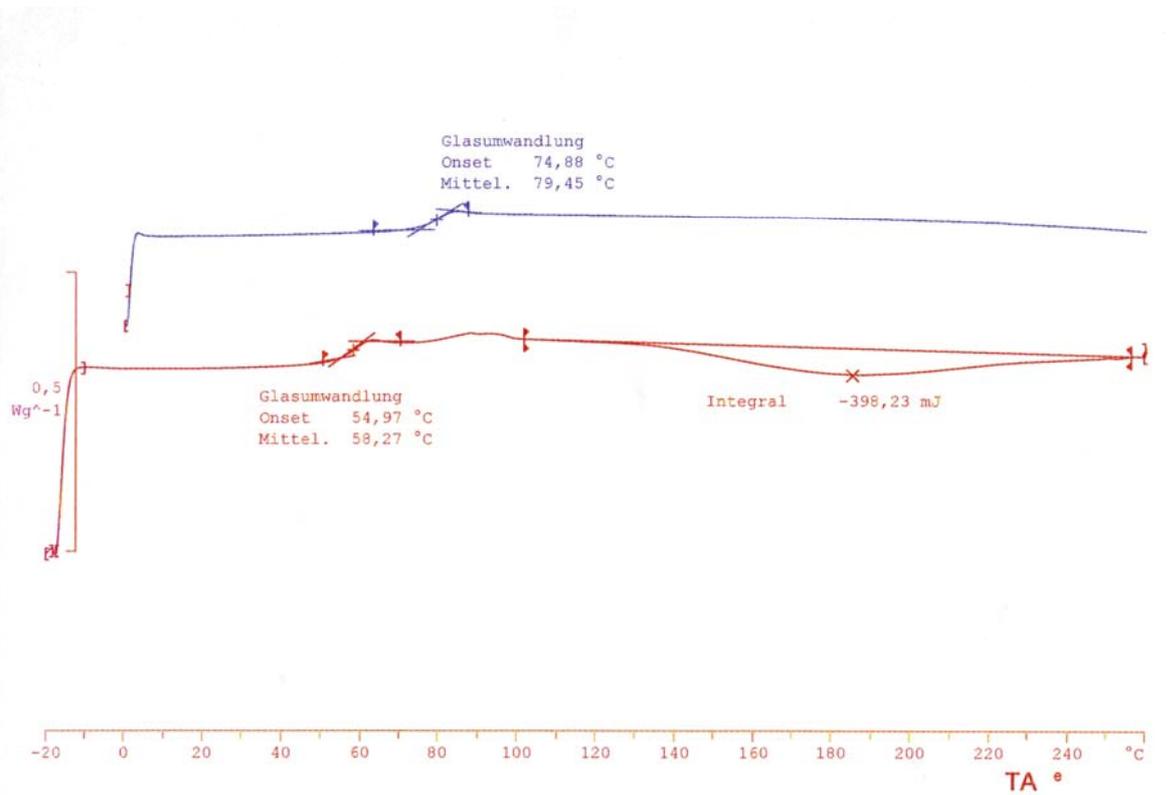


Abbildung 52: DSC-Aufnahme F58-8, Pulver

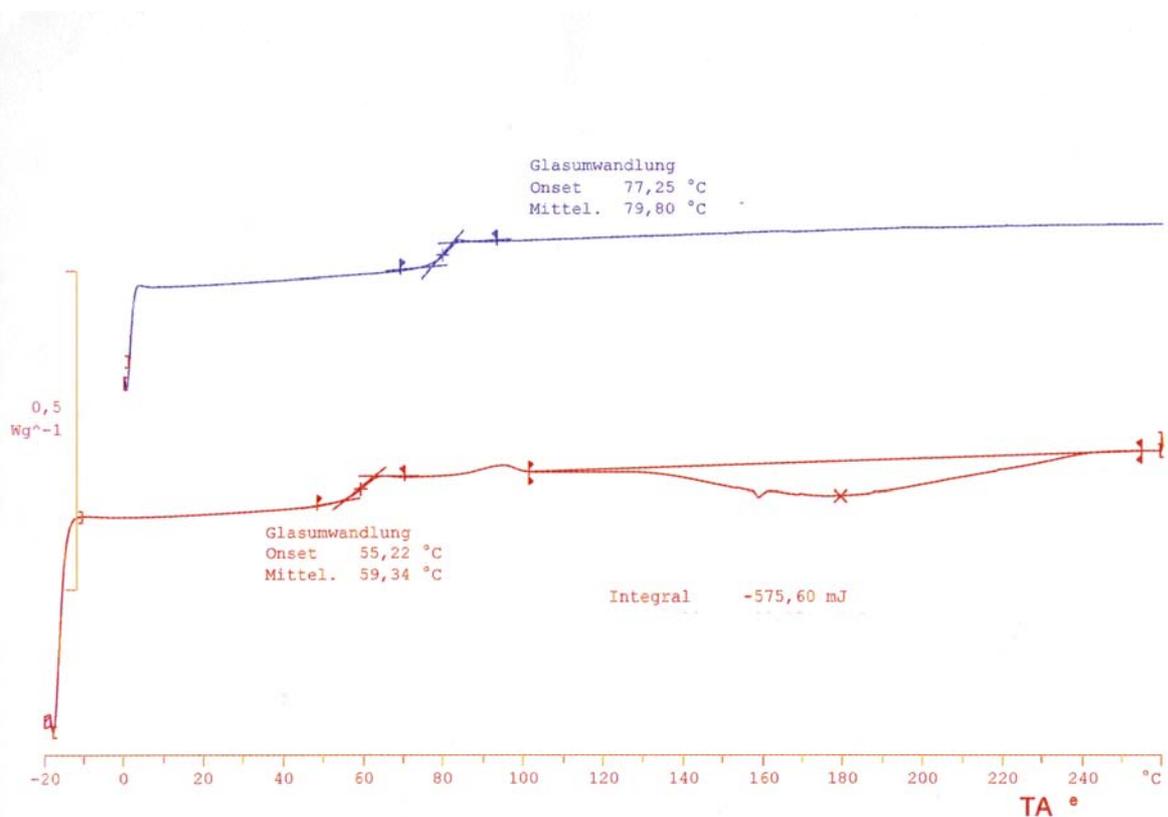


Abbildung 53: DSC-Aufnahme F58-9, Pulver

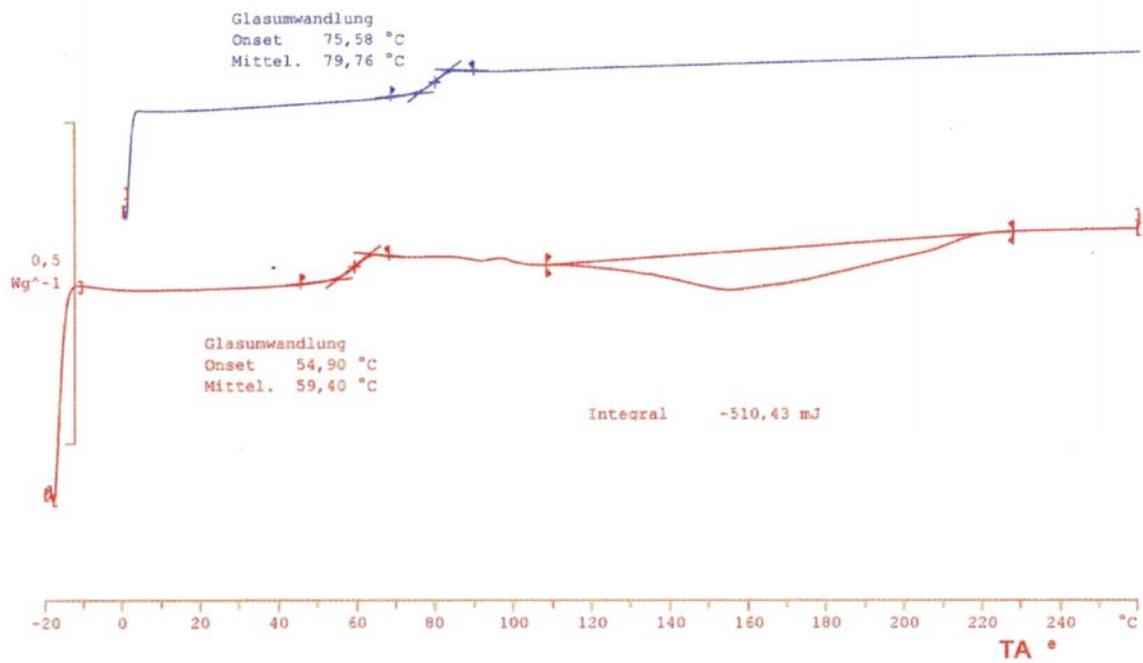


Abbildung 54: DSC-Aufnahme F58-10, Pulver

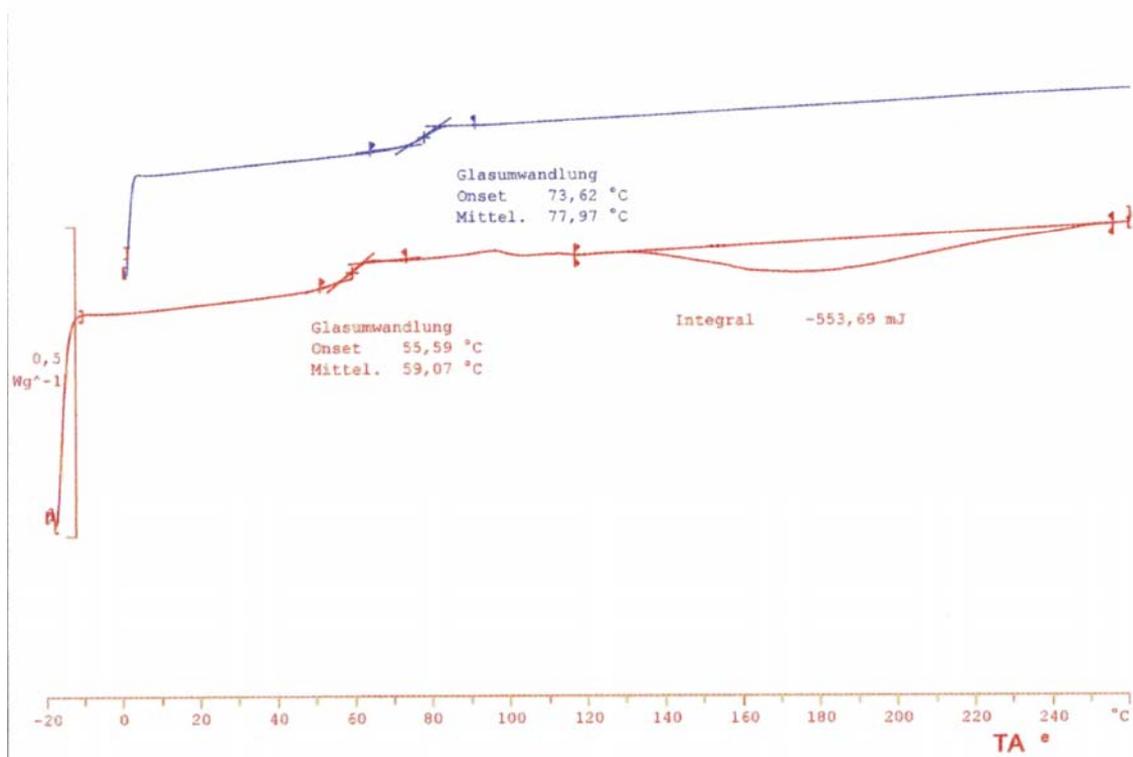


Abbildung 55: DSC-Aufnahme F58-11, Pulver

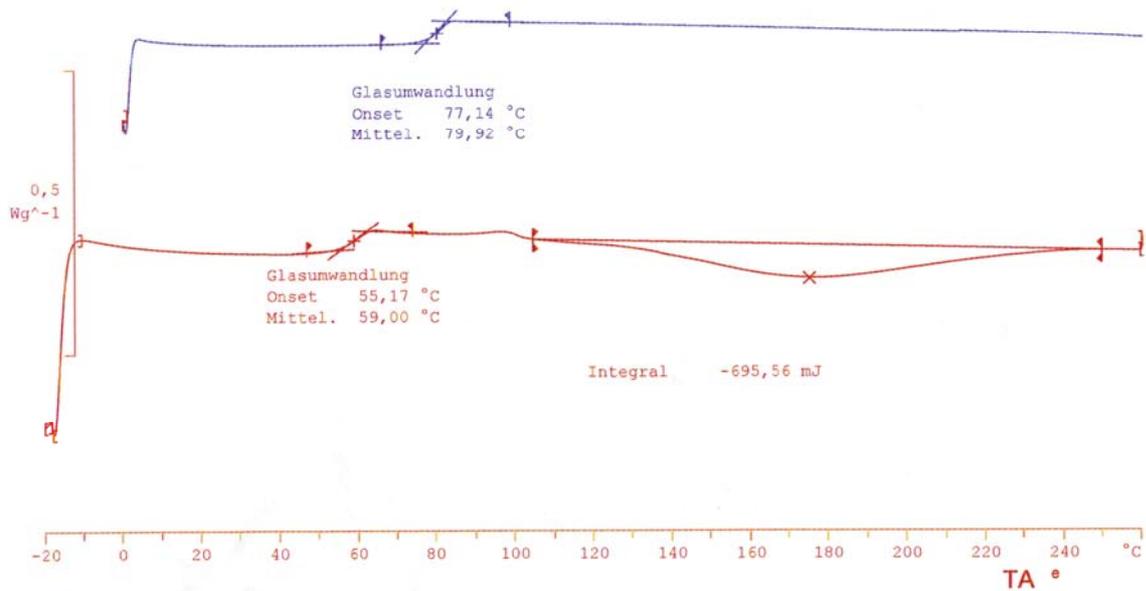


Abbildung 56: DSC-Aufnahme F58-12, Pulver

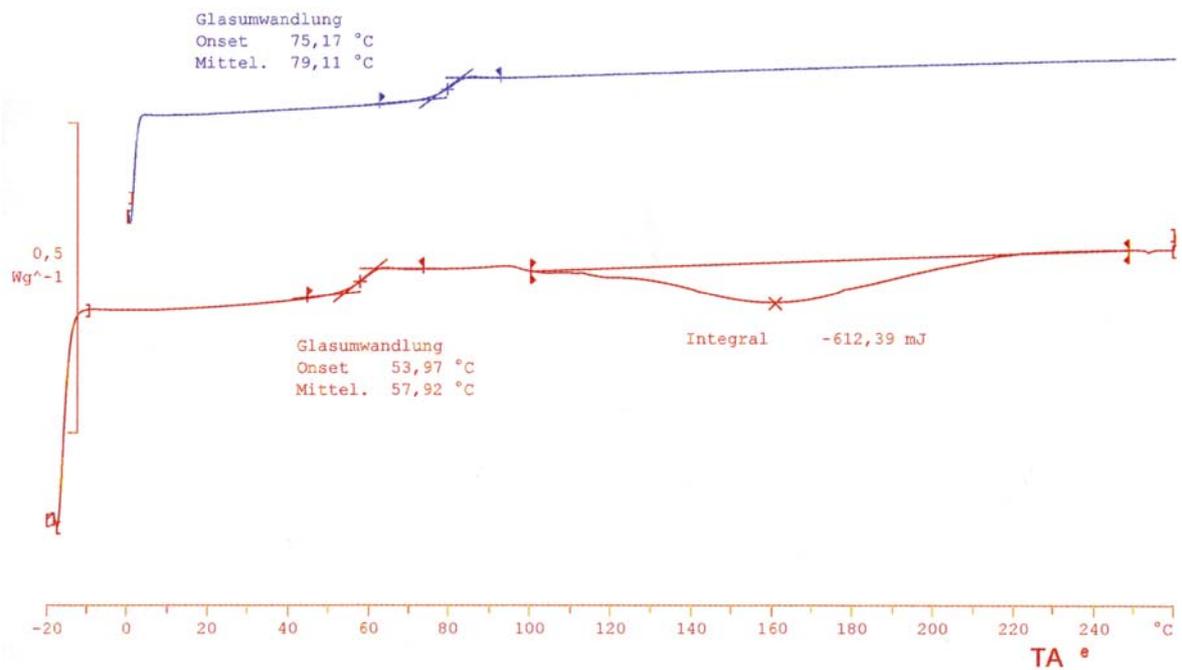


Abbildung 57: DSC-Aufnahme F58-13, Pulver

### 9.1.3 Mindestbestrahlzeiten mittels NIR

Proben-Name	Beschleuniger	Stoffmenge Beschleuniger [mol]	Geschwindigkeit [mm/s]	Aushärtungszeit [s] <sup>21</sup>	Glasübergangstemperatur [°C]
F58-2	Beschleuniger A	0,0005	20	12,5	77,11
F58-3	Beschleuniger A	0,001	22	11,36	78,01
F58-4	Beschleuniger A	0,0025	23	10,87	77,75
F58-5	Beschleuniger B	0,0005	25	10	76,8
F58-6	Beschleuniger B	0,001	27	9,26	76,91
F58-7	Beschleuniger B	0,0025	29	8,62	77,74
F58-8	Beschleuniger C	0,0005	21	11,90	77,92
F58-9	Beschleuniger C	0,001	24	10,42	76,27
F58-10	Beschleuniger C	0,0025	26	9,62	78,12
F58-11	Beschleuniger D	0,0005	22	11,36	77,15
F58-12	Beschleuniger D	0,001	25	10	76,67
F58-13	Beschleuniger D	0,0025	27	9,26	78,63

**Tabelle 53: Einbrennparameter bei der Ermittlung von Mindestbestrahlzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern (ausgehärtet)**

Proben-Name	Beschleuniger	Stoffmenge Beschleuniger [mol]	Geschwindigkeit [mm/s]	Aushärtungszeit [s] <sup>22</sup>	Glasübergangstemperatur [°C]
F58-2	Beschleuniger A	0,0005	21	11,90	75,97
F58-3	Beschleuniger A	0,001	23	10,87	75,56
F58-4	Beschleuniger A	0,0025	24	10,42	76,97
F58-5	Beschleuniger B	0,0005	26	9,62	70,83
F58-6	Beschleuniger B	0,001	28	8,93	69,43
F58-7	Beschleuniger B	0,0025	30	8,33	73,95
F58-8	Beschleuniger C	0,0005	22	11,36	72,92
F58-9	Beschleuniger C	0,001	25	10	71
F58-10	Beschleuniger C	0,0025	27	9,26	75,3
F58-11	Beschleuniger D	0,0005	23	10,87	74,98
F58-12	Beschleuniger D	0,001	26	9,62	73,79
F58-13	Beschleuniger D	0,0025	28	8,93	74,26

**Tabelle 54: Einbrennparameter bei der Ermittlung von Mindestbestrahlzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern (gerade noch nicht ausgehärtet)**

<sup>21</sup> Die Aushärtungszeit  $t$  berechnet sich aus:  $t = \text{Bestrahlungslänge} / \text{Geschwindigkeit}$ , die Bestrahlungslänge entspricht der Emitterlänge von 250 mm  $\Rightarrow t = 250 \text{ mm} / \text{Geschwindigkeit [mm/s]}$

<sup>22</sup> Die Aushärtungszeit  $t$  berechnet sich aus:  $t = \text{Bestrahlungslänge} / \text{Geschwindigkeit}$ , die Bestrahlungslänge entspricht der Emitterlänge von 250 mm  $\Rightarrow t = 250 \text{ mm} / \text{Geschwindigkeit [mm/s]}$

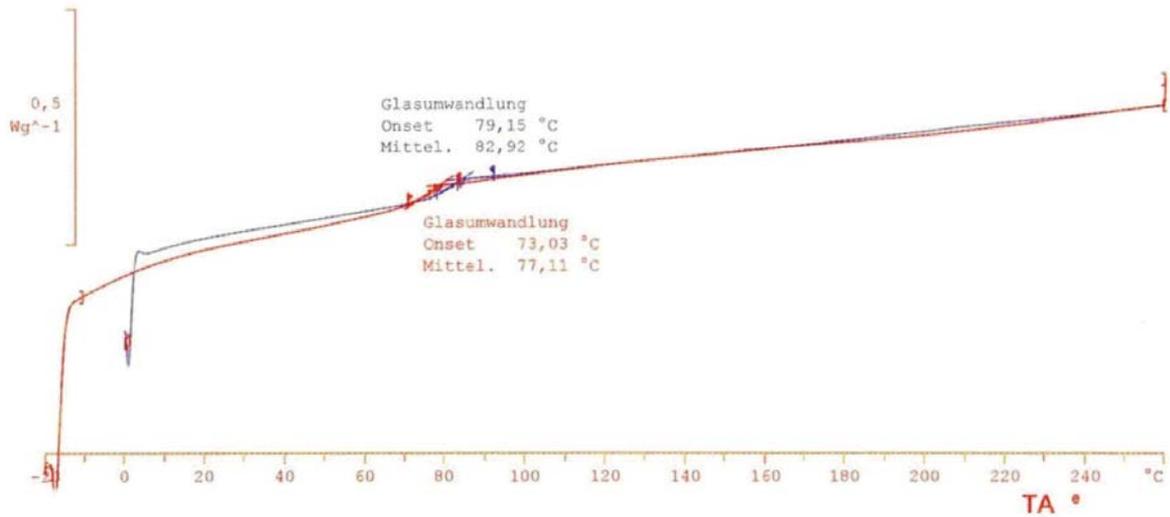


Abbildung 58: DSC-Aufnahme F58-2, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 20 mm/s

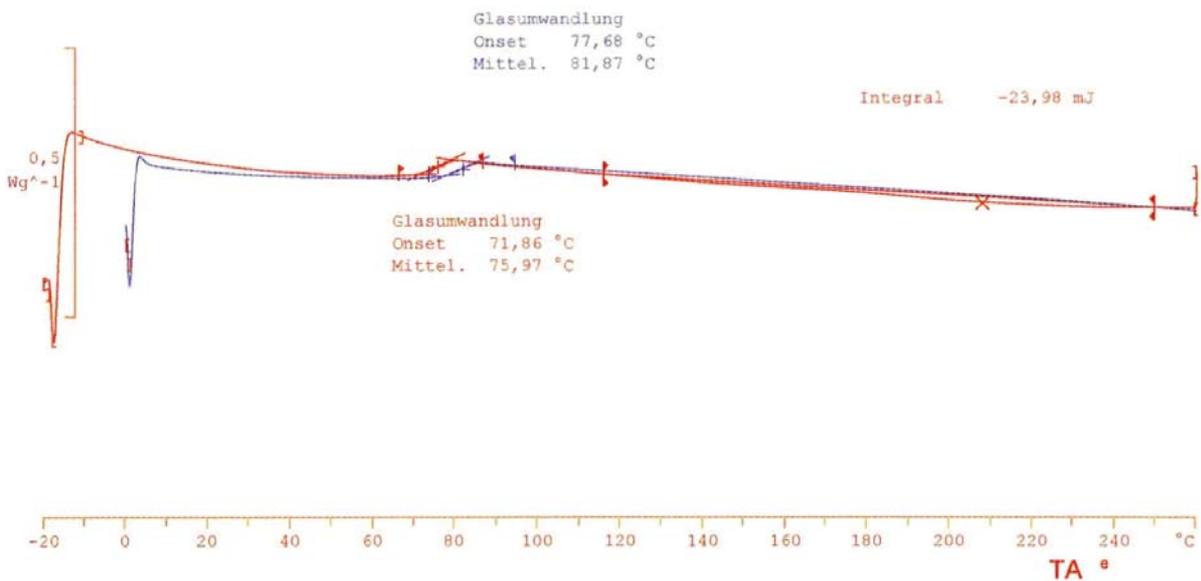


Abbildung 59: DSC-Aufnahme F58-2, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 21 mm/s

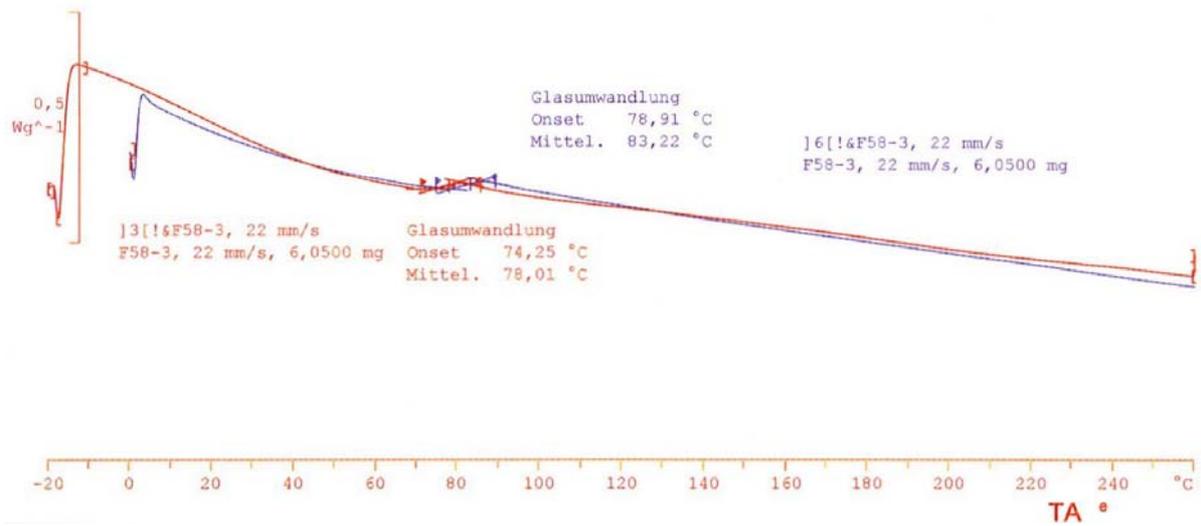


Abbildung 60: DSC-Aufnahme F58-3, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 22 mm/s

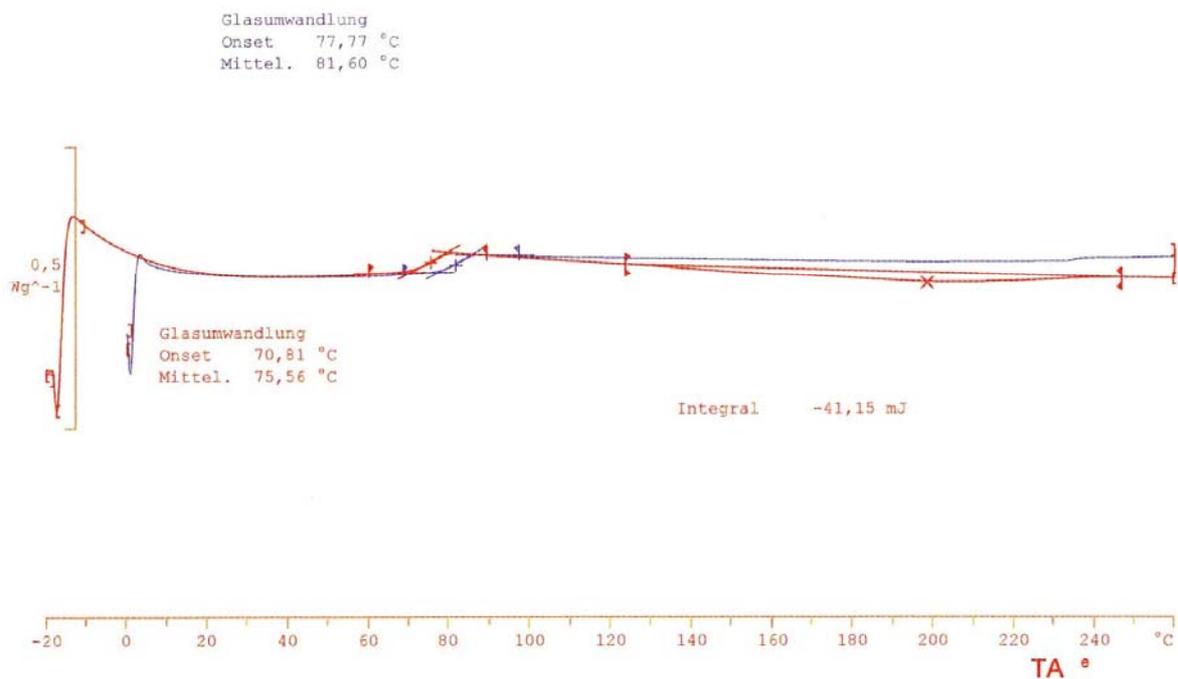


Abbildung 61: DSC-Aufnahme F58-3, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 23 mm/s

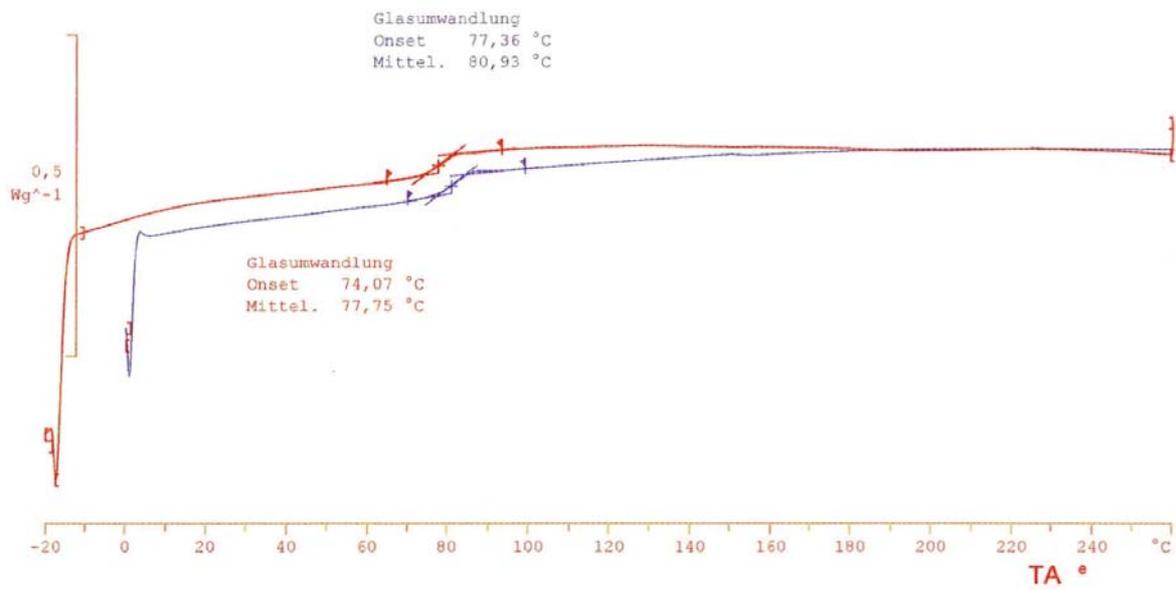


Abbildung 62: DSC-Aufnahme F58-4, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 23 mm/s

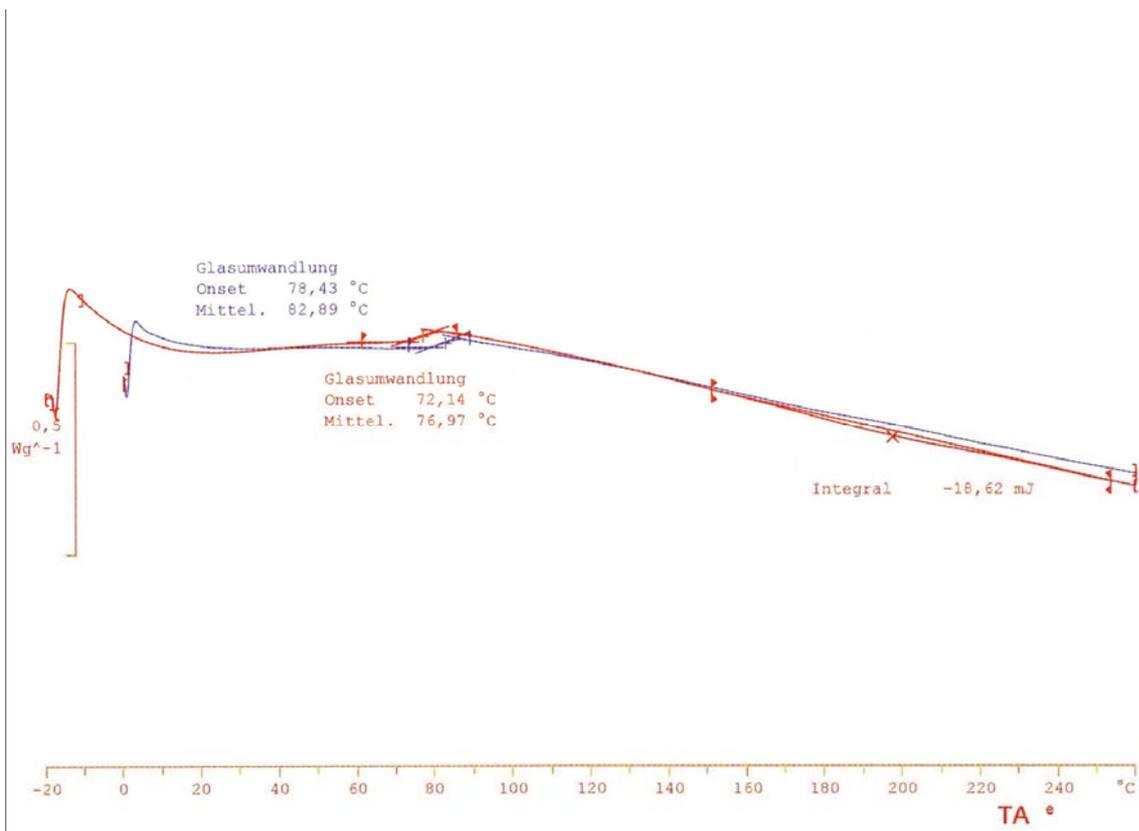


Abbildung 63: DSC-Aufnahme F58-4, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 24 mm/s

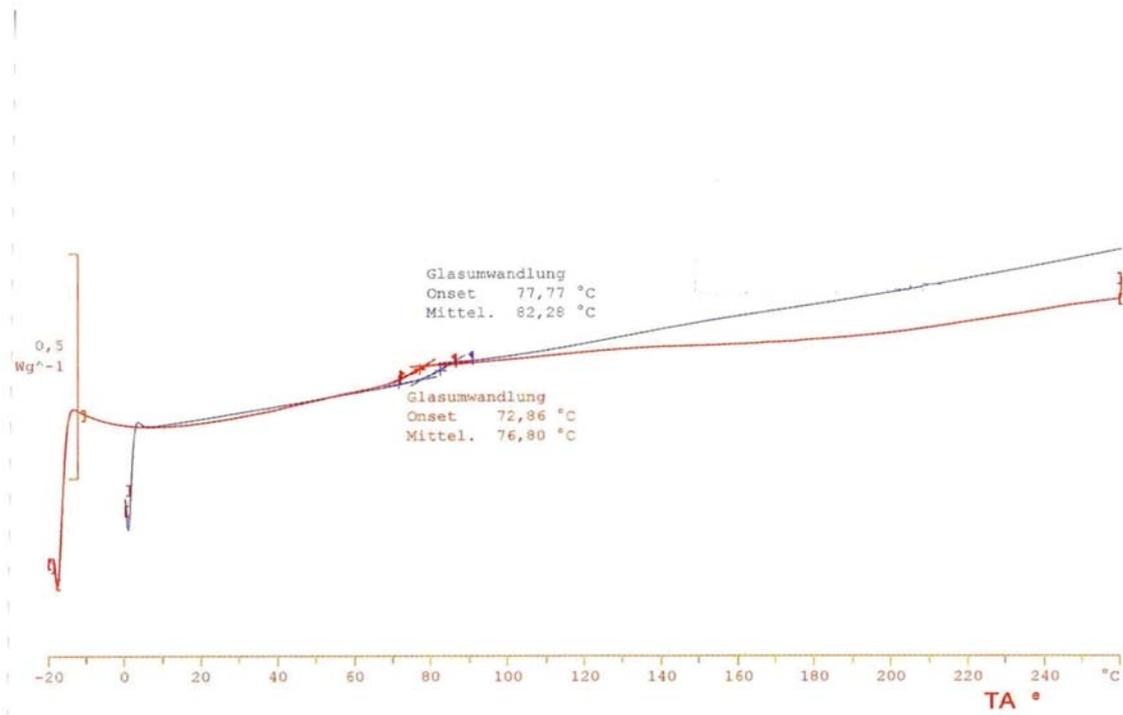


Abbildung 64: DSC-Aufnahme F58-5, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 25 mm/s

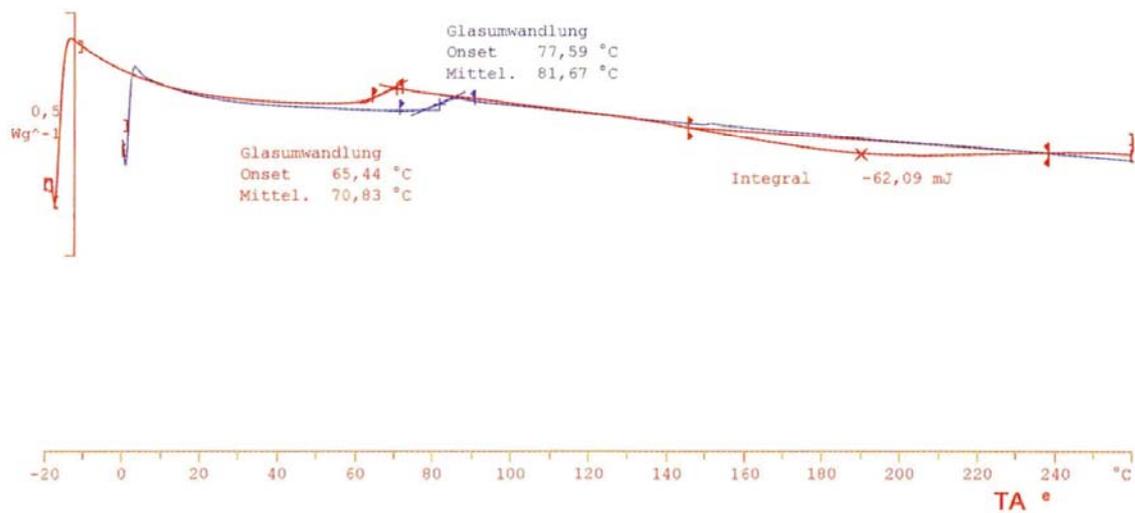


Abbildung 65: DSC-Aufnahme F58-5, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 26 mm/s

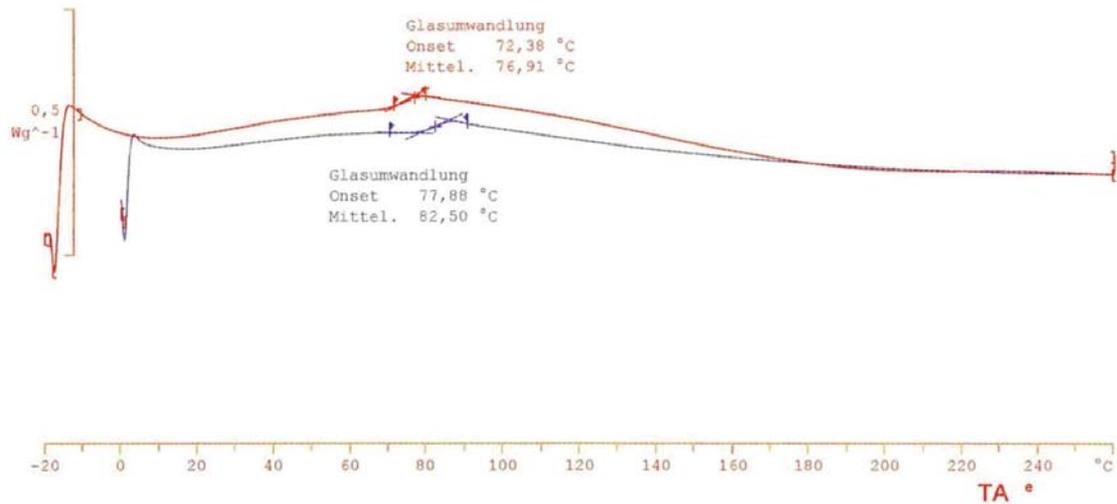


Abbildung 66: DSC-Aufnahme F58-6, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 27 mm/s

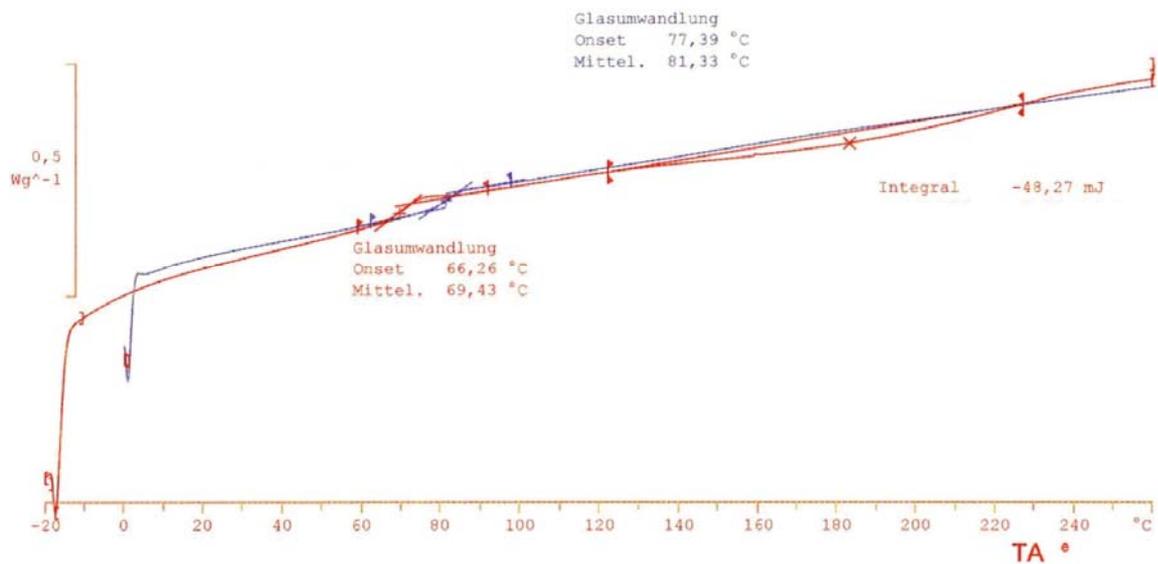


Abbildung 67: DSC-Aufnahme F58-6, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 28 mm/s

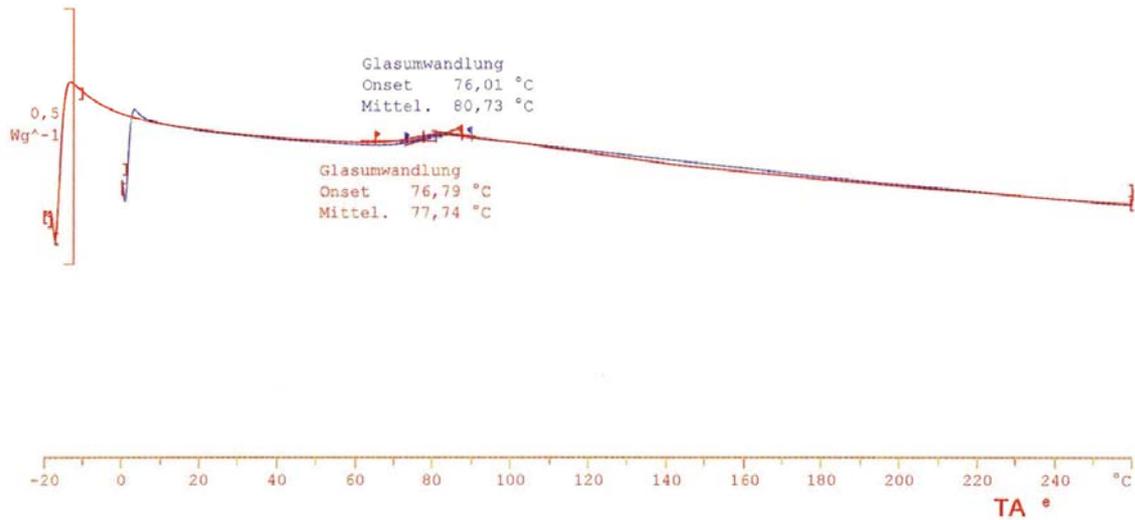


Abbildung 68: DSC-Aufnahme F58-7, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 29 mm/s

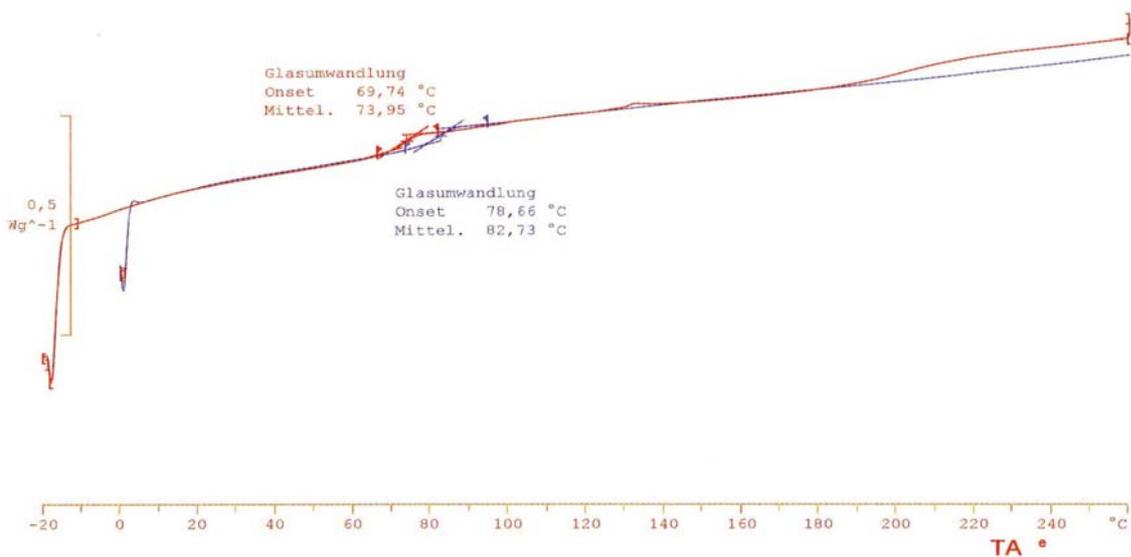


Abbildung 69: DSC-Aufnahme F58-7, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 30 mm/s

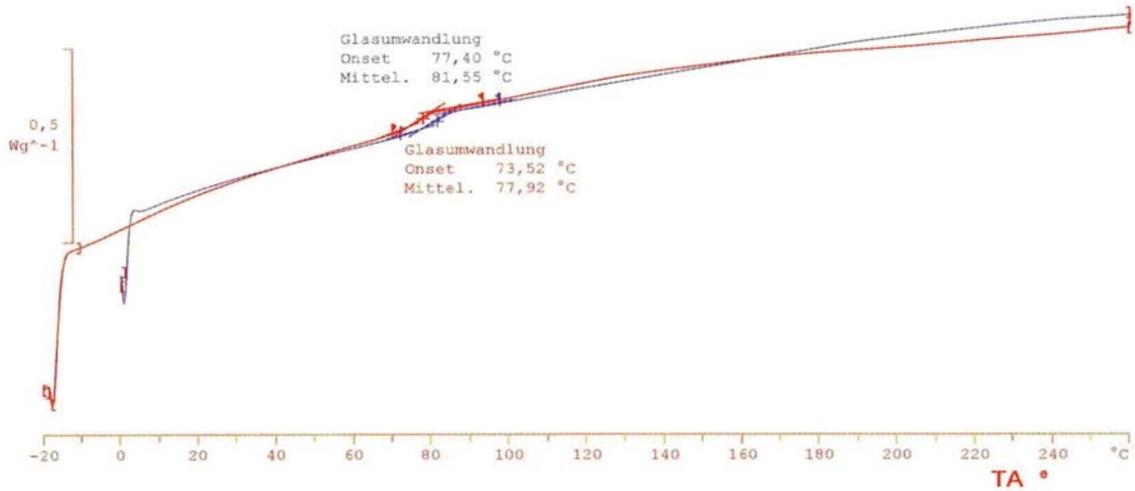


Abbildung 70: DSC-Aufnahme F58-8, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 21 mm/s

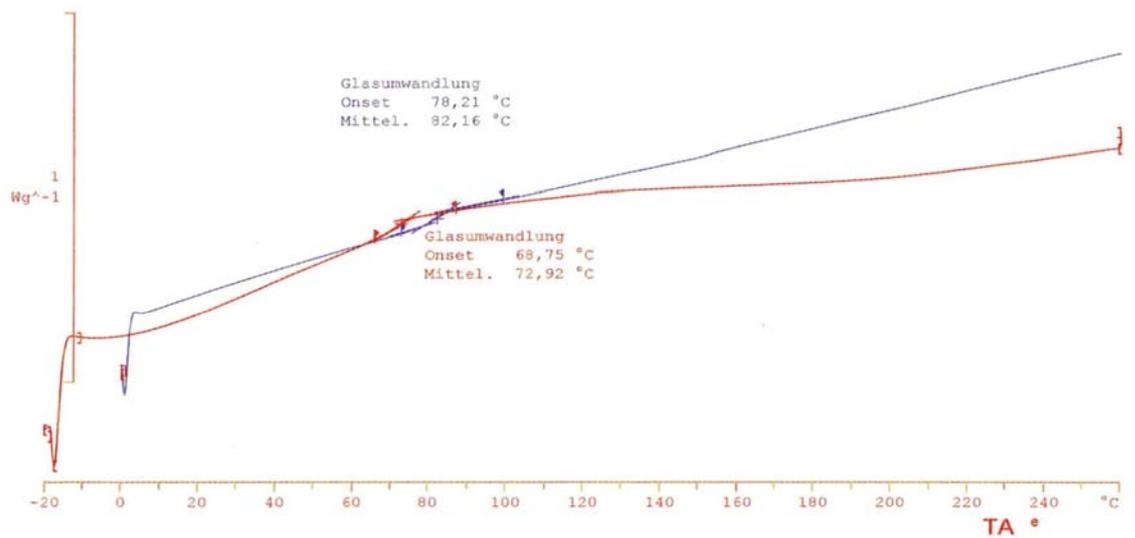


Abbildung 71: DSC-Aufnahme F58-8, NB-Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 22 mm/s

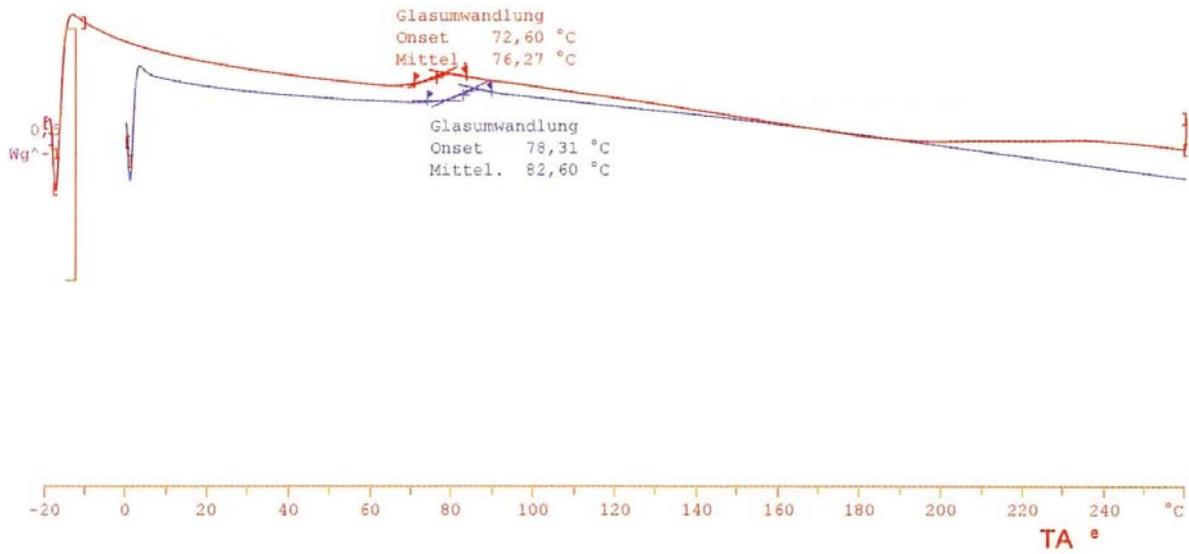


Abbildung 72: DSC-Aufnahme F58-9, NB-Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 24 mm/s

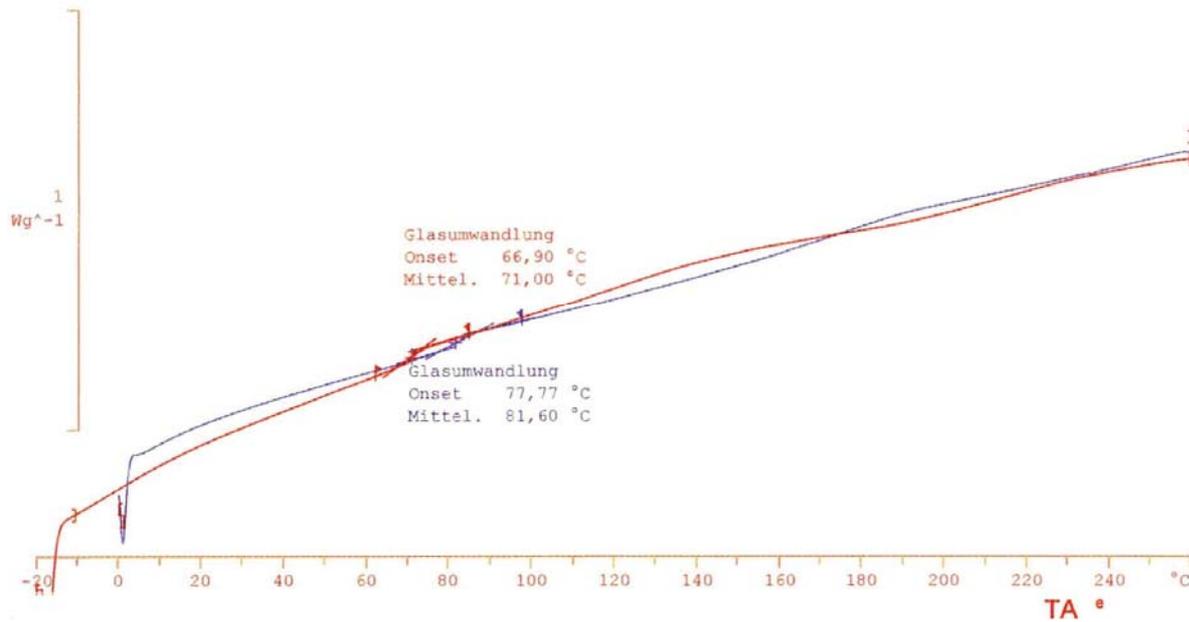
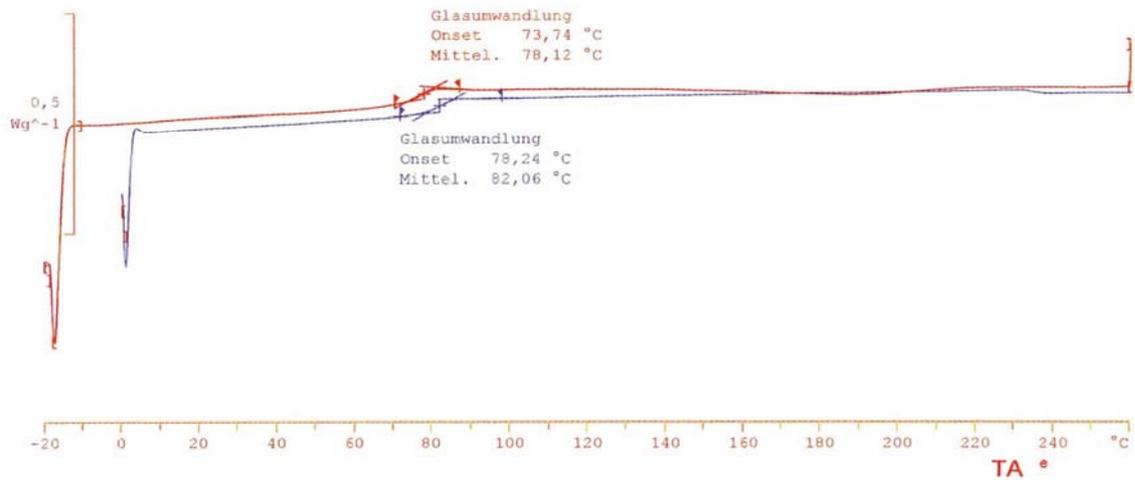
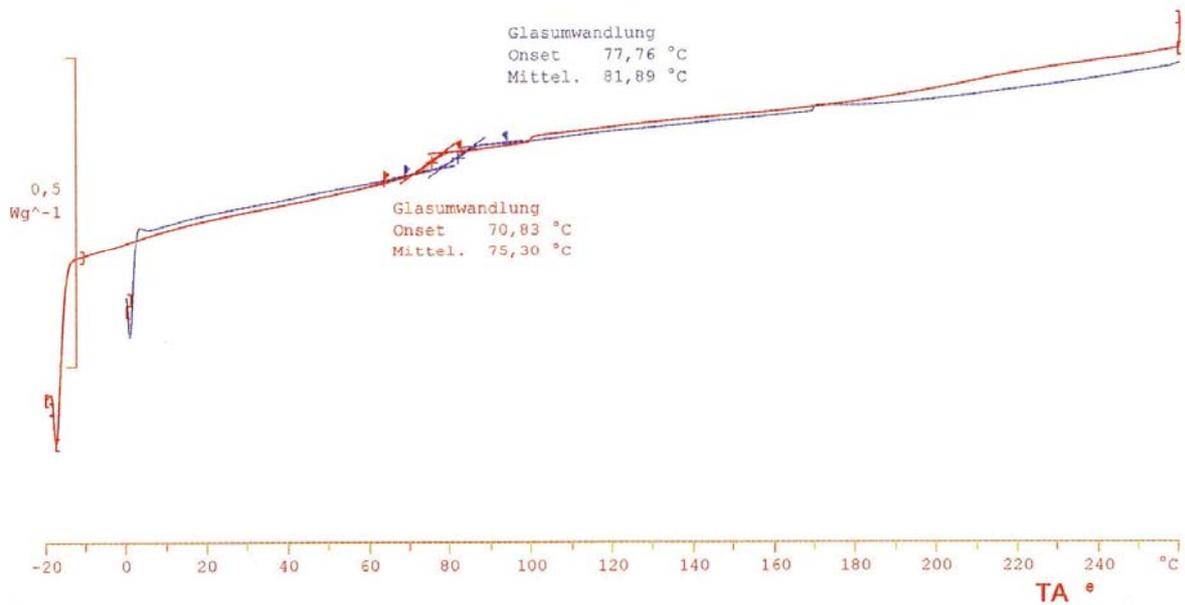


Abbildung 73: DSC-Aufnahme F58-9, NB-Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 25 mm/s



**Abbildung 74: DSC-Aufnahme F58-10, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 26 mm/s**



**Abbildung 75: DSC-Aufnahme F58-10, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 27 mm/s**

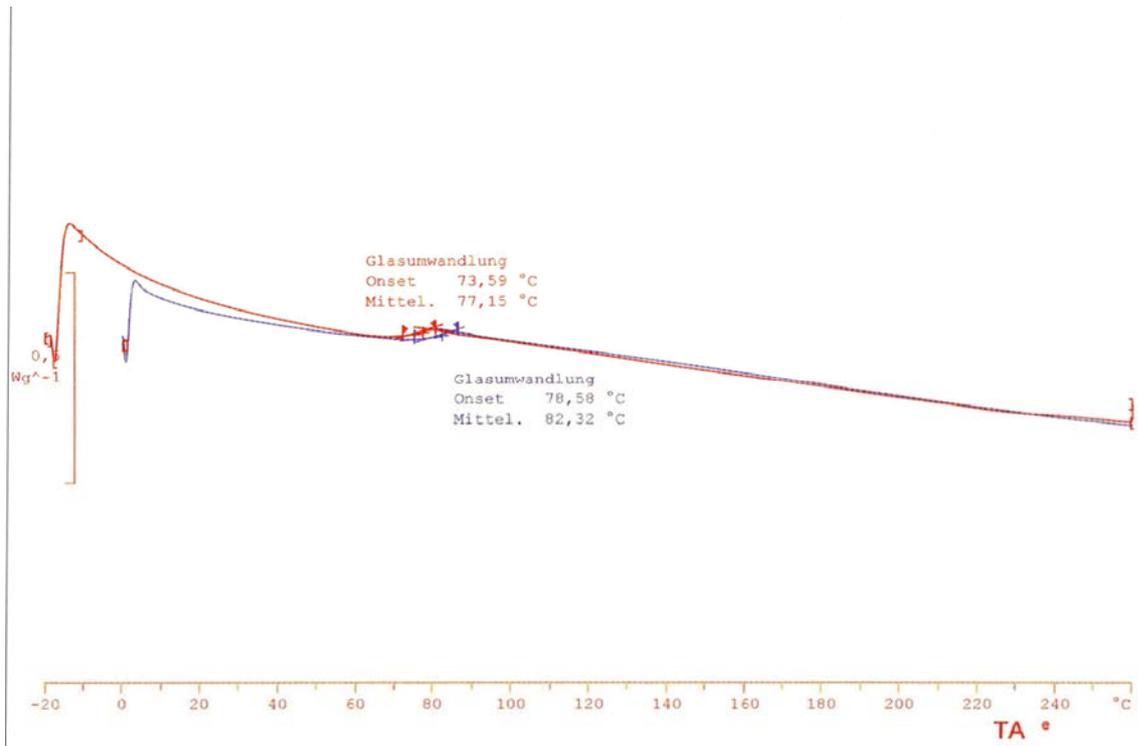


Abbildung 76: DSC-Aufnahme F58-11, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 22 mm/s

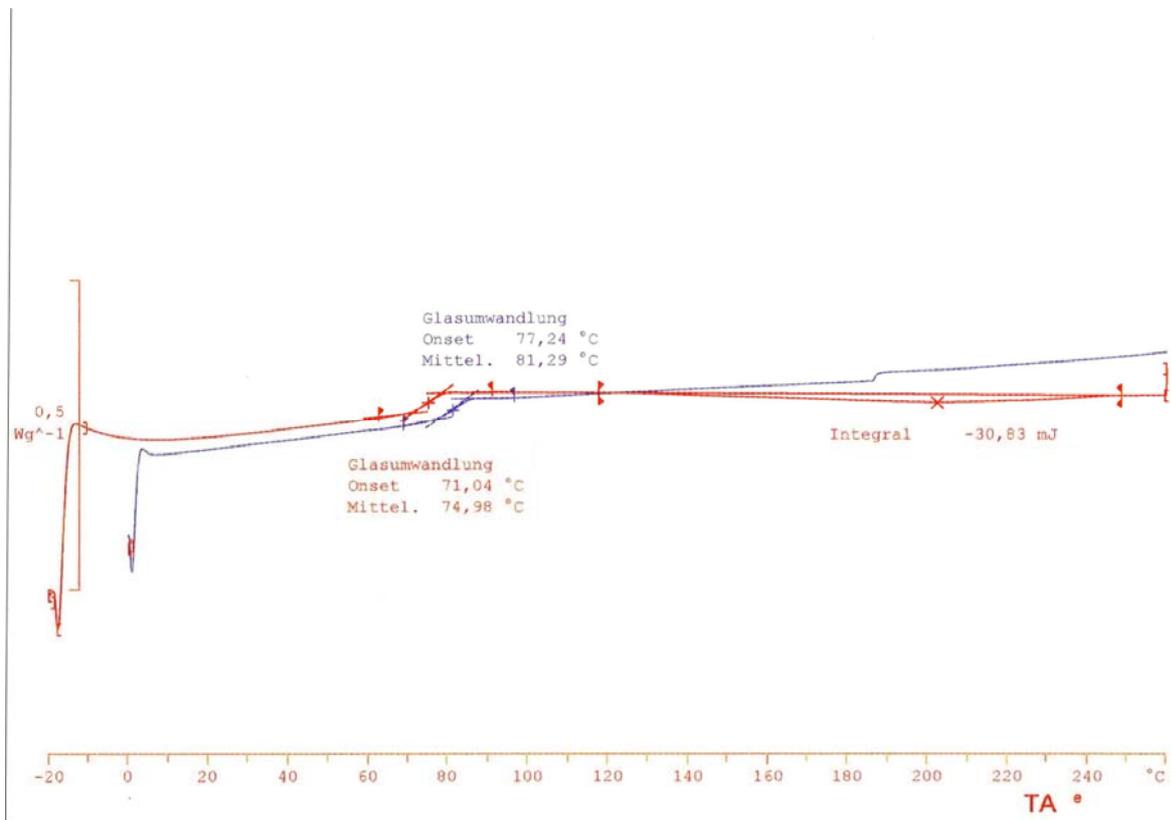
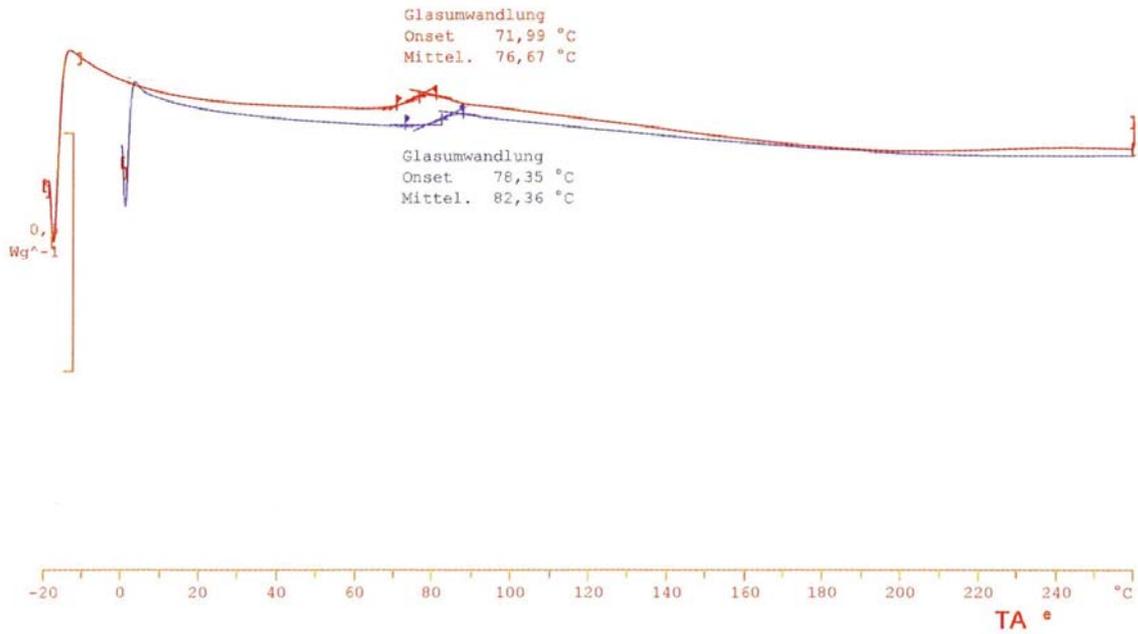
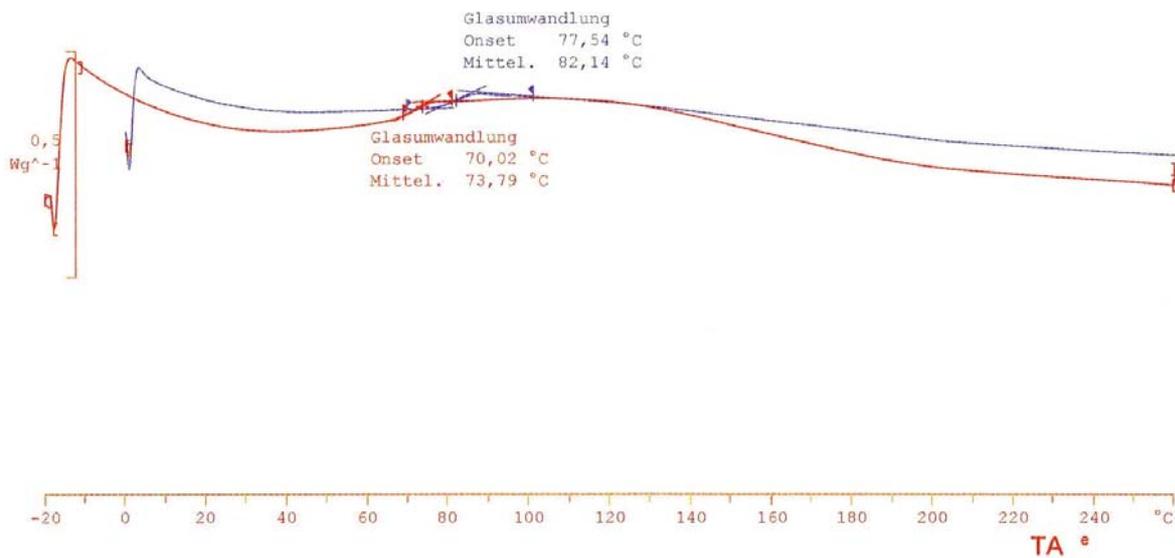


Abbildung 77: DSC-Aufnahme F58-11, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 23 mm/s



**Abbildung 78: DSC-Aufnahme F58-12, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 25 mm/s**



**Abbildung 79: DSC-Aufnahme F58-12, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 26 mm/s**

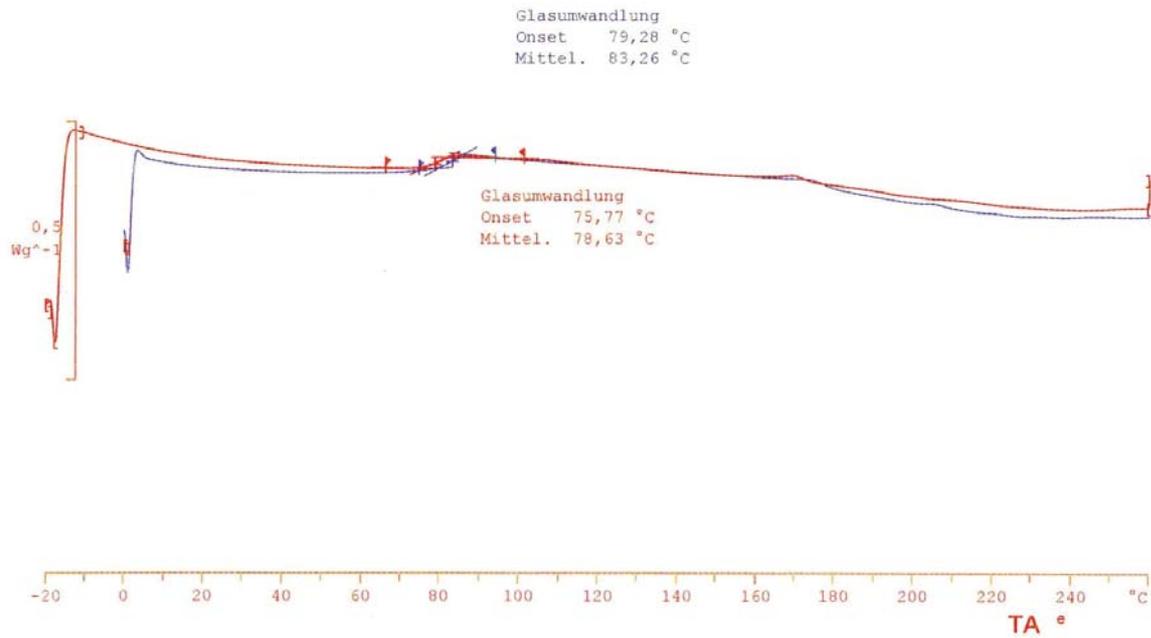


Abbildung 80: DSC-Aufnahme F58-13, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 27 mm/s

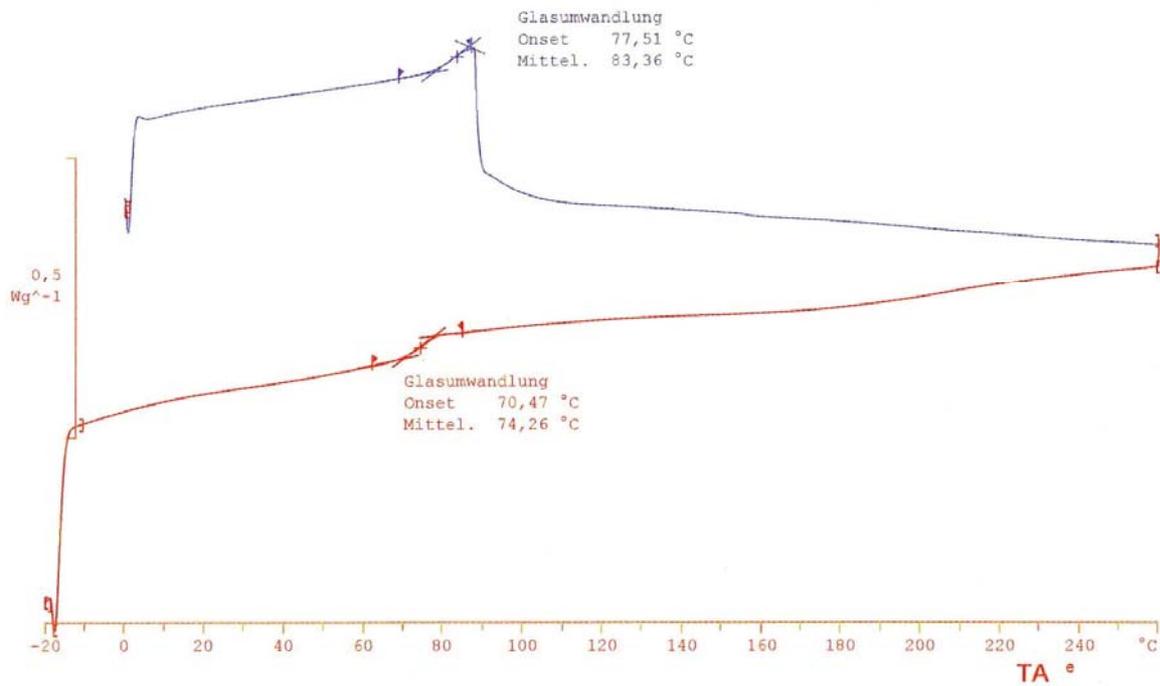


Abbildung 81: DSC-Aufnahme F58-13, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 28 mm/s

## 9.2 Vergleichende Untersuchungen von unterschiedlichen Aushärtungsmethoden an unterschiedlichen NIR-härtbaren Pulverlacken

### 9.2.1 DSC-Messungen

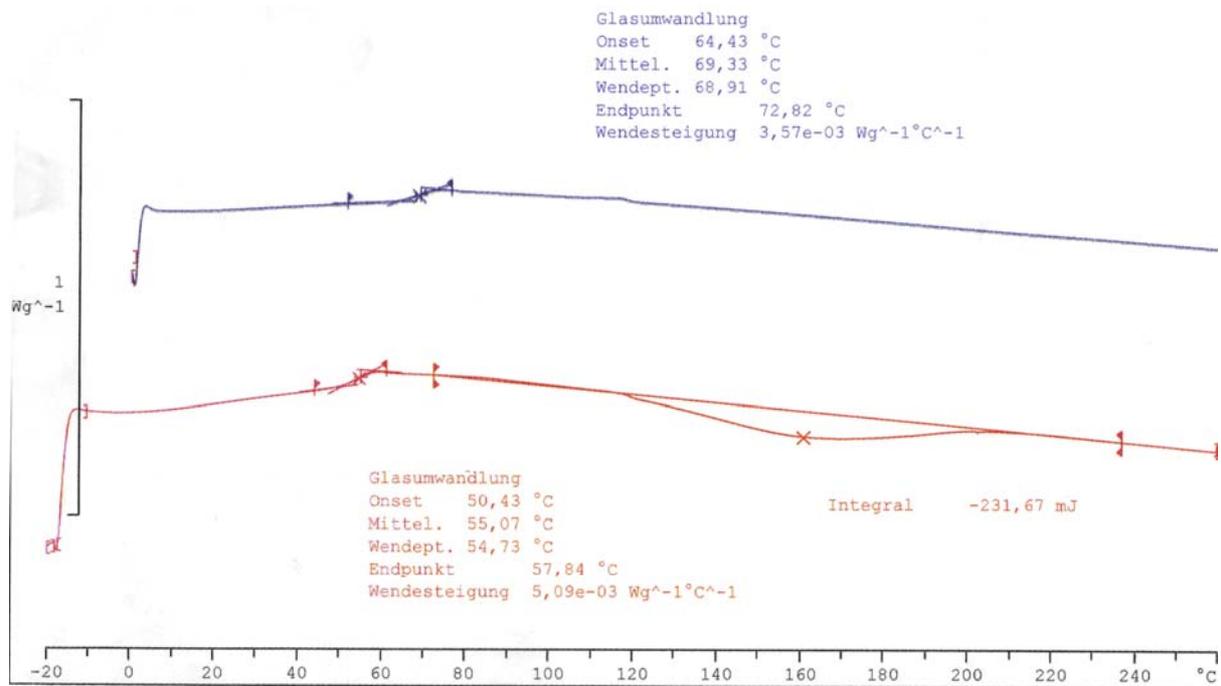


Abbildung 82: DSC-Aufnahme des NIR3-1113 Pulvers

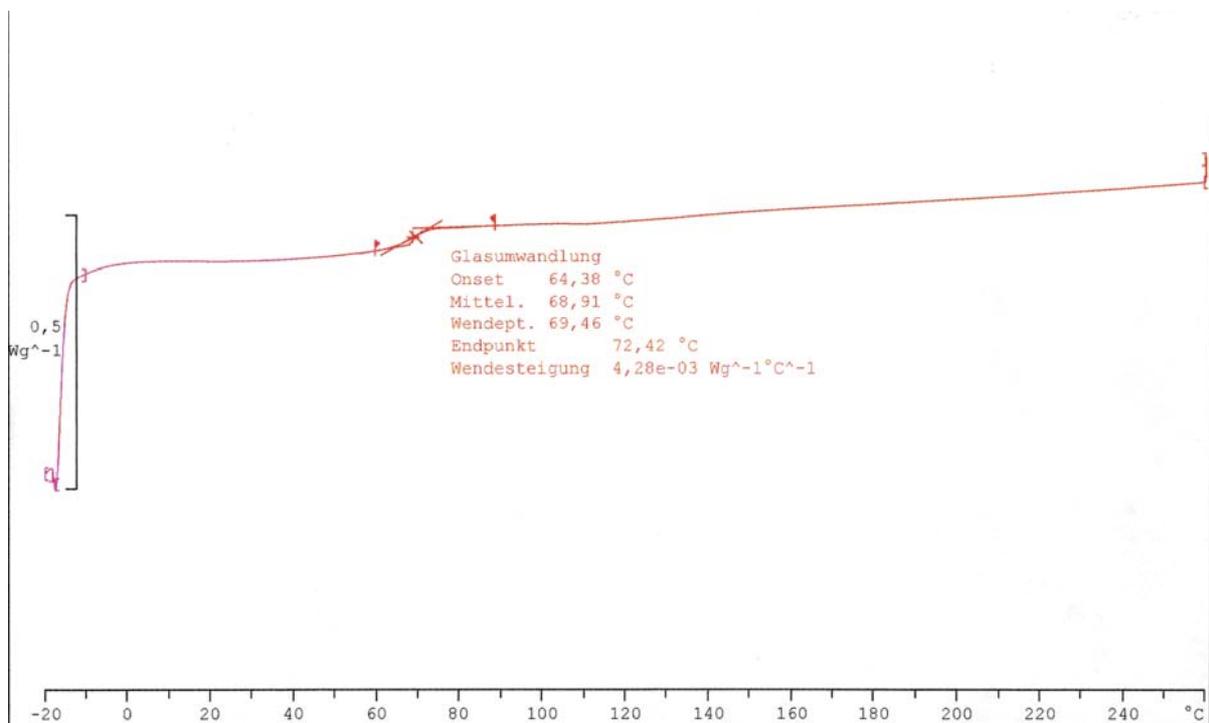


Abbildung 83: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (NB, 100%, 5 cm, 30 mm/s)

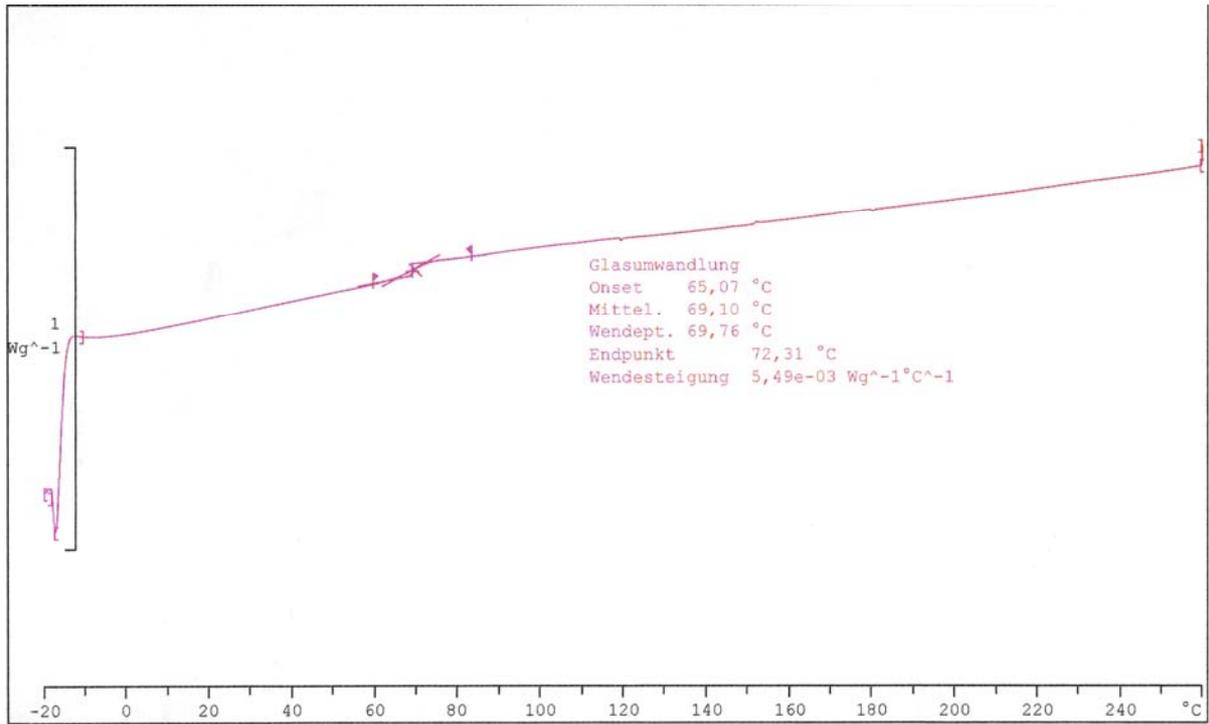


Abbildung 84: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (NB, 50%, 5 cm, 15 mm/s)

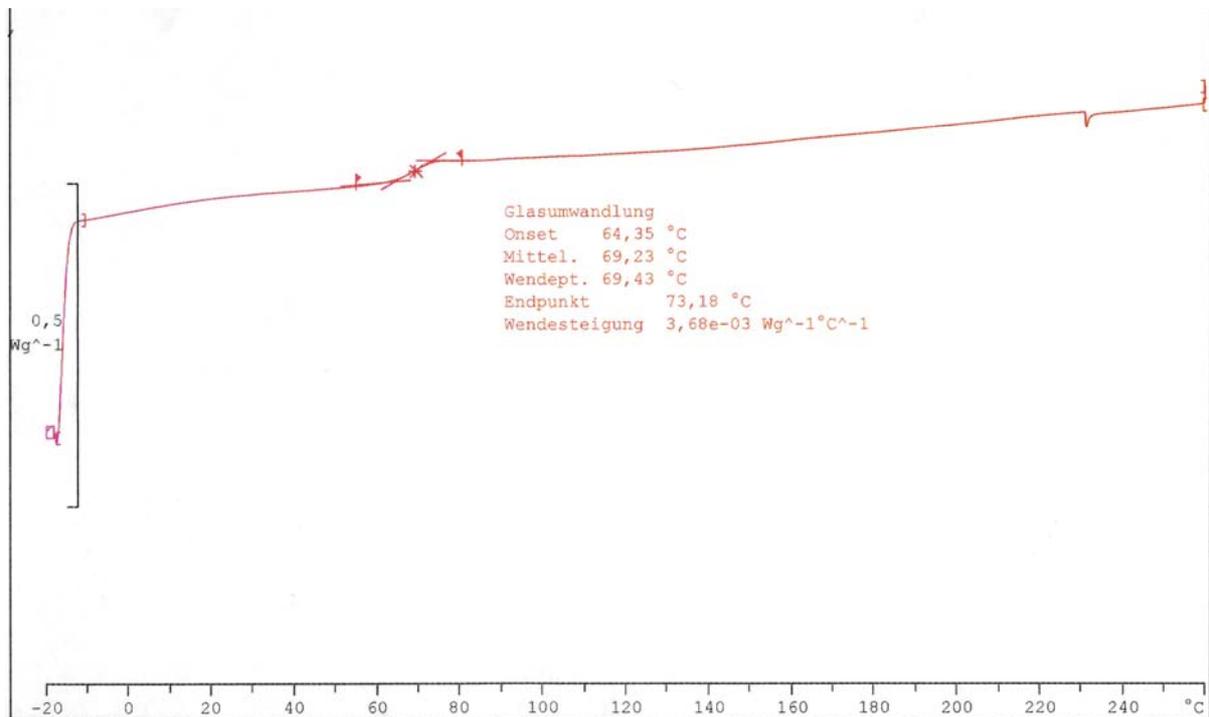


Abbildung 85: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (HB, 100%, 5 cm, 60 mm/s)

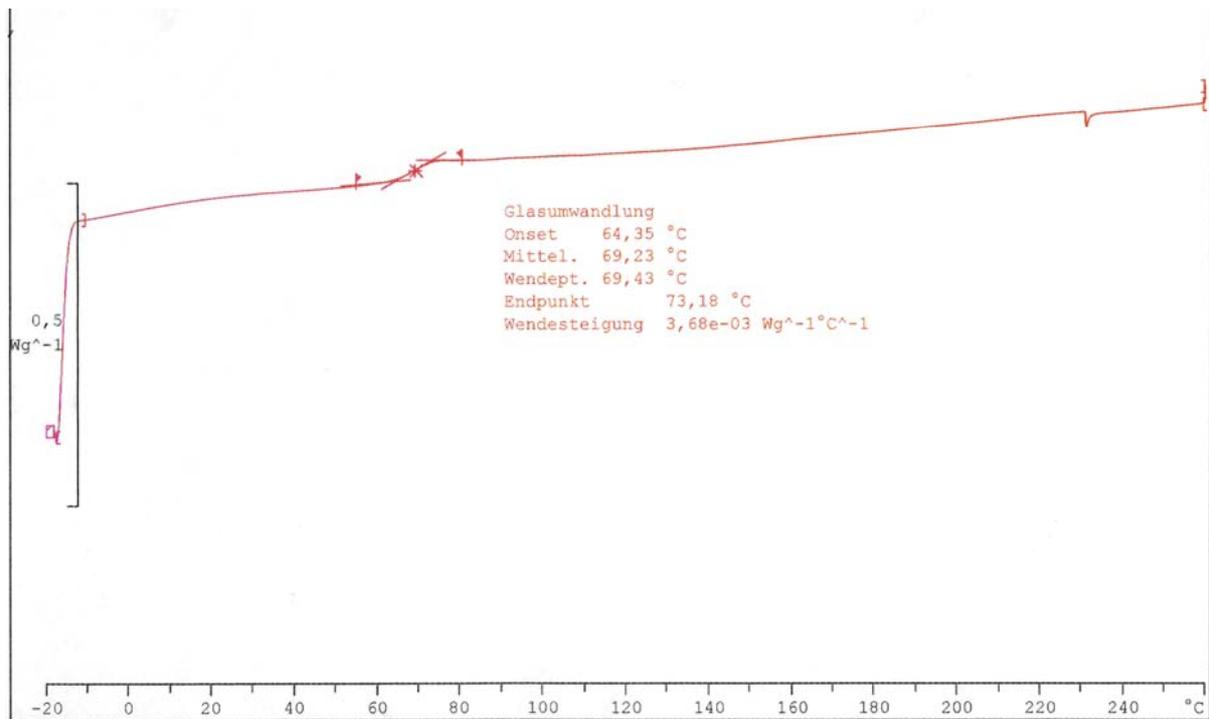


Abbildung 86: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (HB, 50%, 5 cm, 30 mm/s)

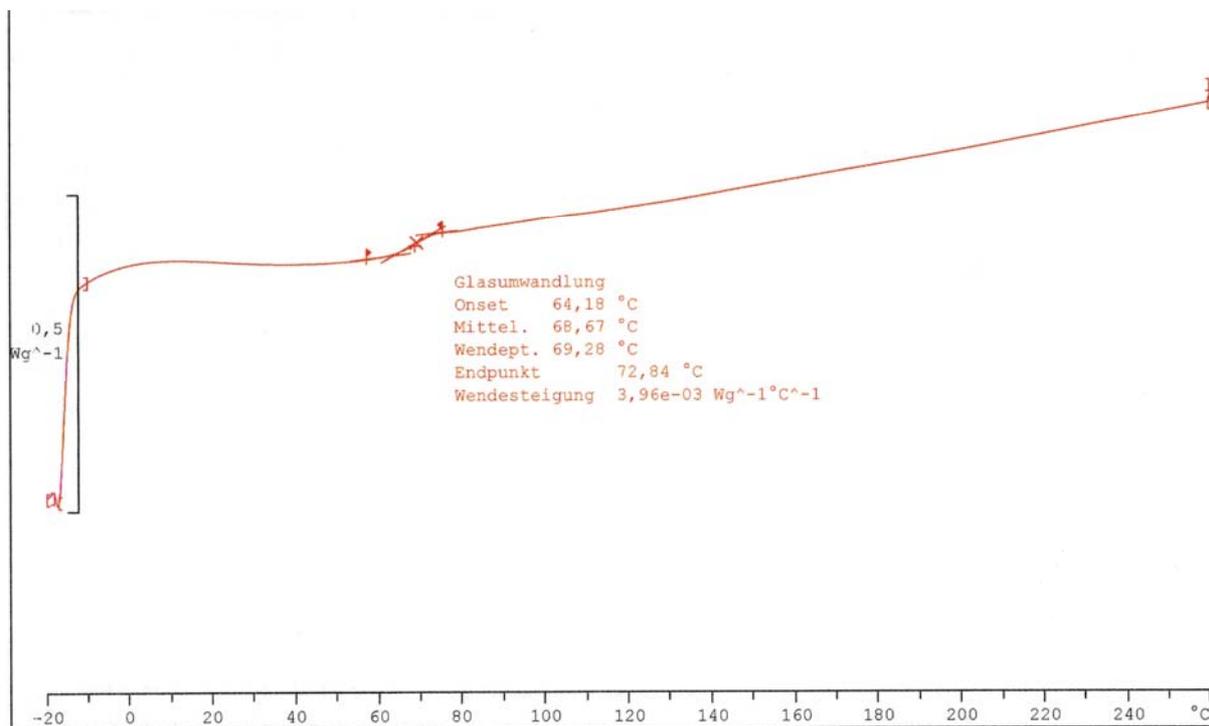


Abbildung 87: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (SB, 100%, 5 cm, 120 mm/s)

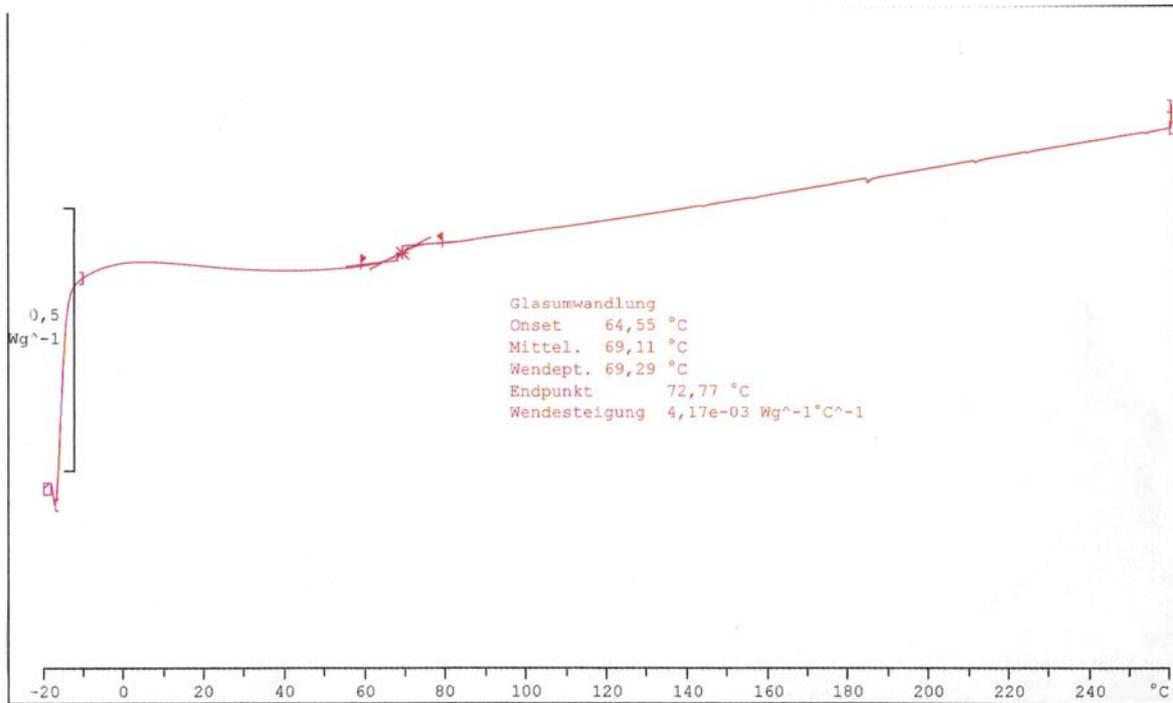


Abbildung 88: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (SB, 50%, 5 cm, 60 mm/s)

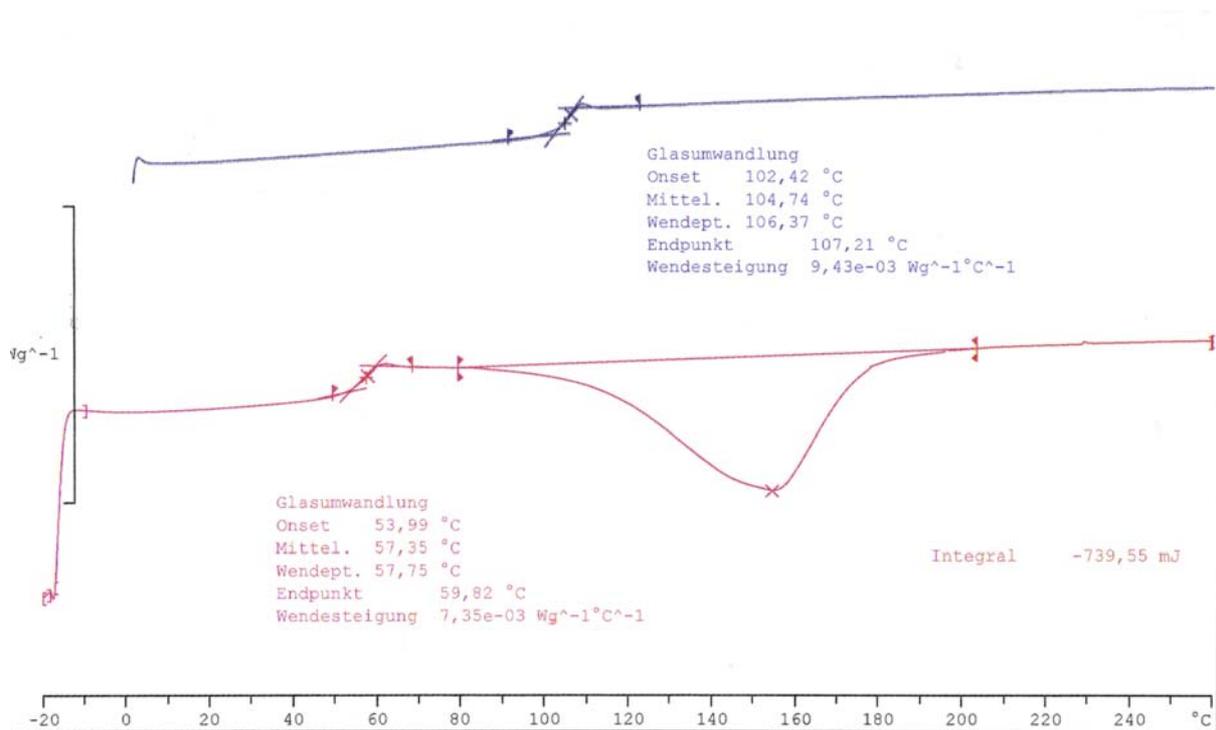


Abbildung 89: DSC-Aufnahme NIR1-9270 Pulver

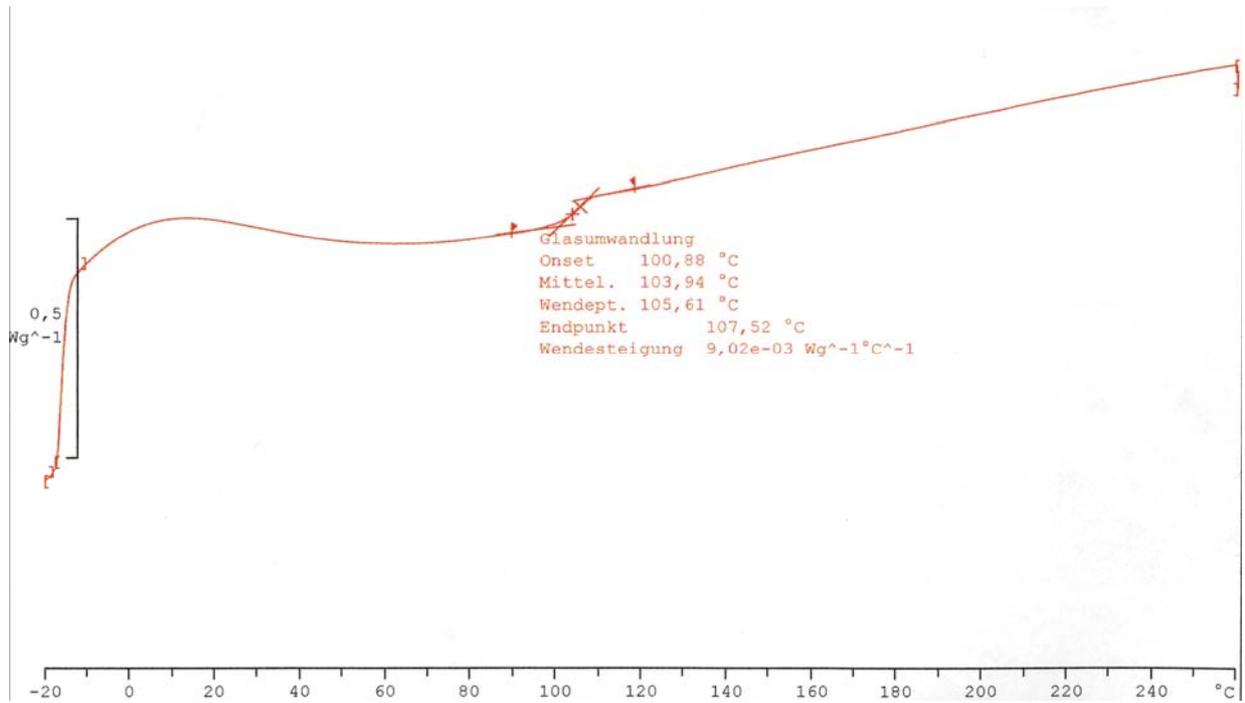


Abbildung 90: DSC-Aufnahme des NIR1-9270-Lacks (NB, 100%, 5 cm, 70 mm/s)

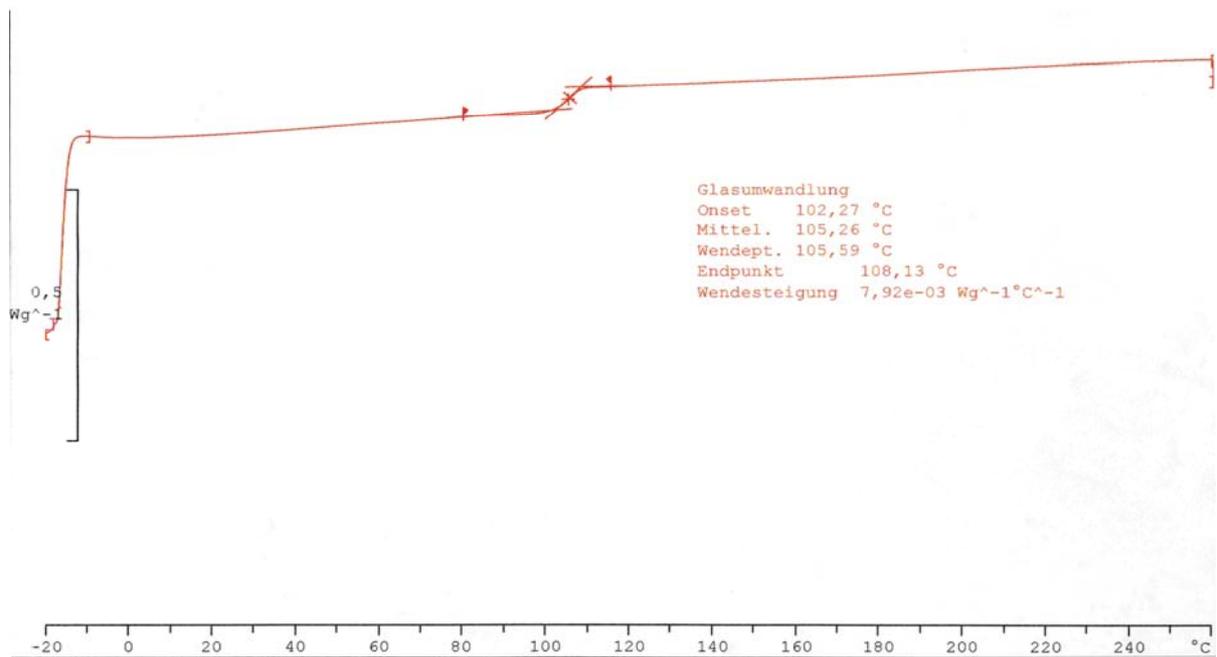


Abbildung 91: DSC-Aufnahme des NIR1-9270-Lacks (NB, 50%, 5 cm, 35 mm/s)

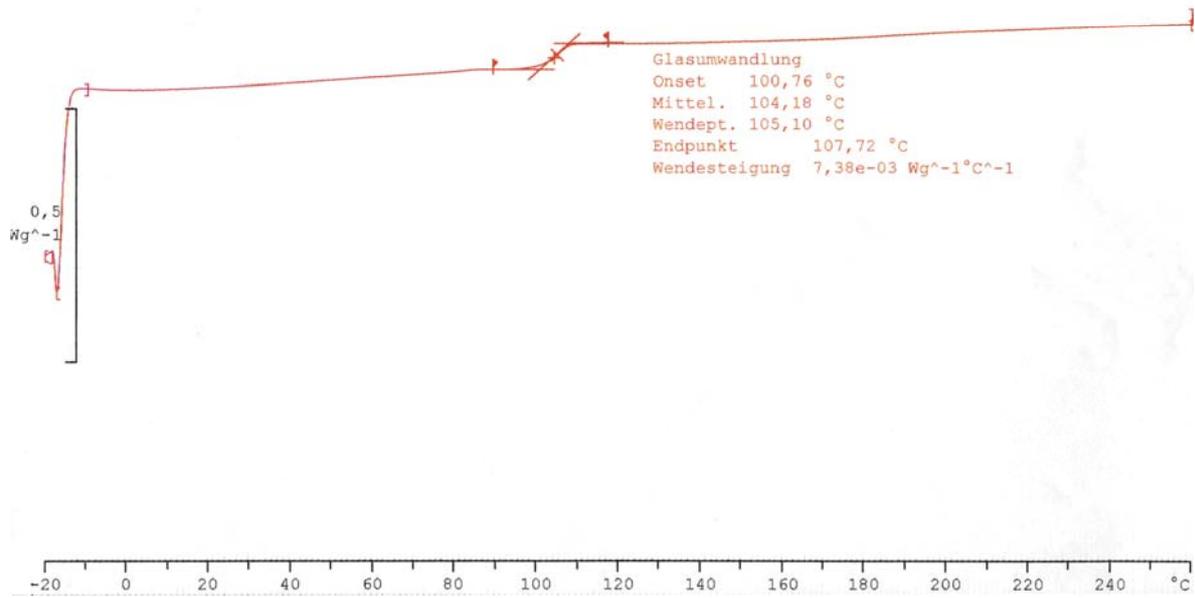


Abbildung 92: DSC-Aufnahme des NIR1-9270-Lacks (HB, 100%, 5 cm, 150 mm/s)

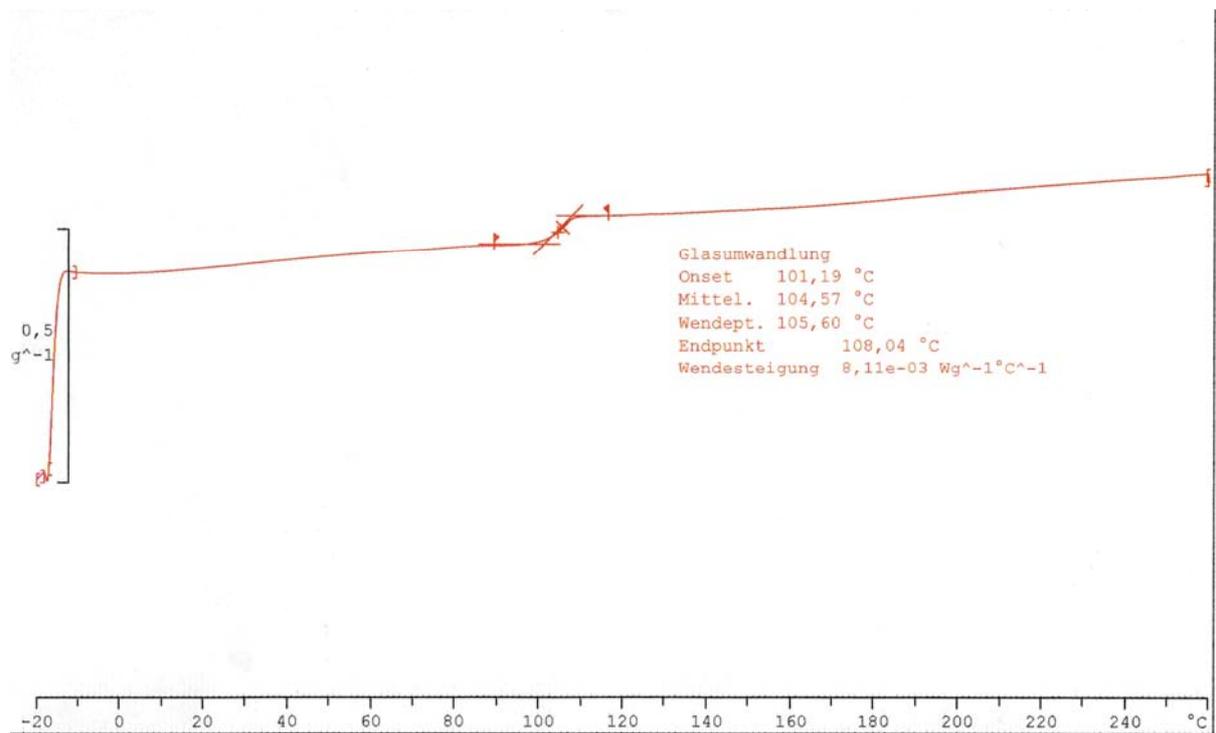
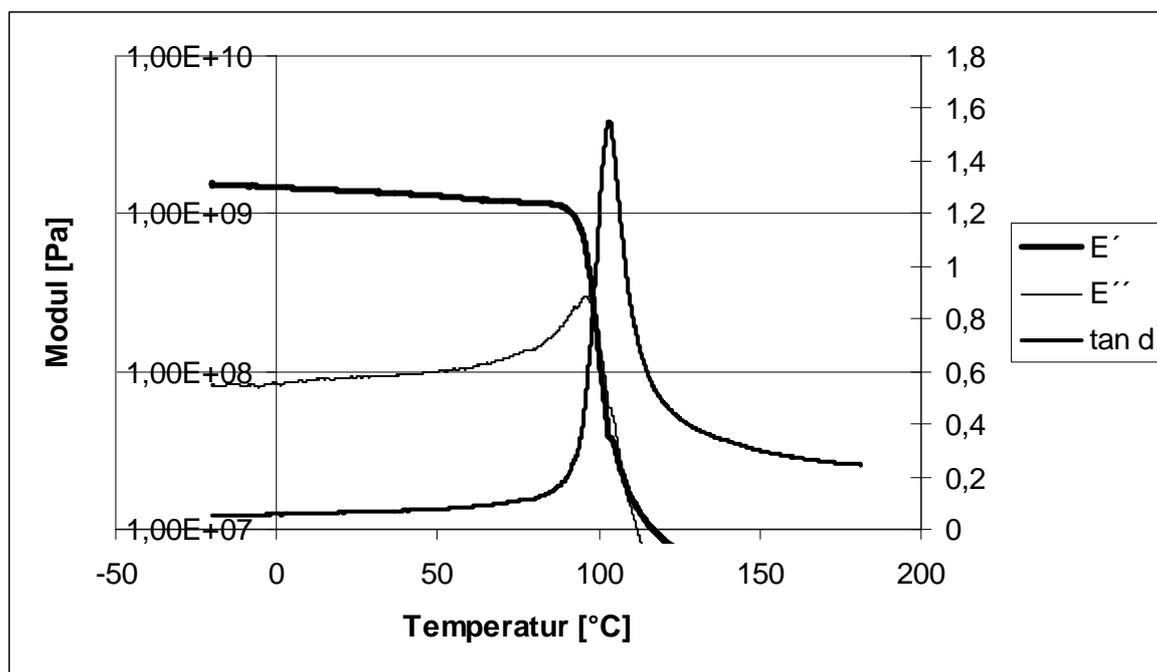


Abbildung 93: DSC-Aufnahme des NIR1-9270-Lacks (HB, 50%, 5 cm, 80 mm/s)

### 9.2.2 DMA- Messungen

<u>Pulverlack</u>	<u>Aushärtungsmethode</u>	<u>E' min[MPa]</u>	<u>Glasübergangstemperatur [°C]</u>
NIR1-9270	NIR	5	103
NIR1-9270	thermisch	4	103
NIR3-1113	NIR	1,4	80
NIR3-1113	thermisch	2,3	81

**Tabelle 55: Ergebnisse der Bestimmung der Glasübergangstemperatur mittels DMA**



**Abbildung 94: DMA-Diagramm der schwarzen Epoxy-Pulverlack-Probe NIR1-9270, NIR**

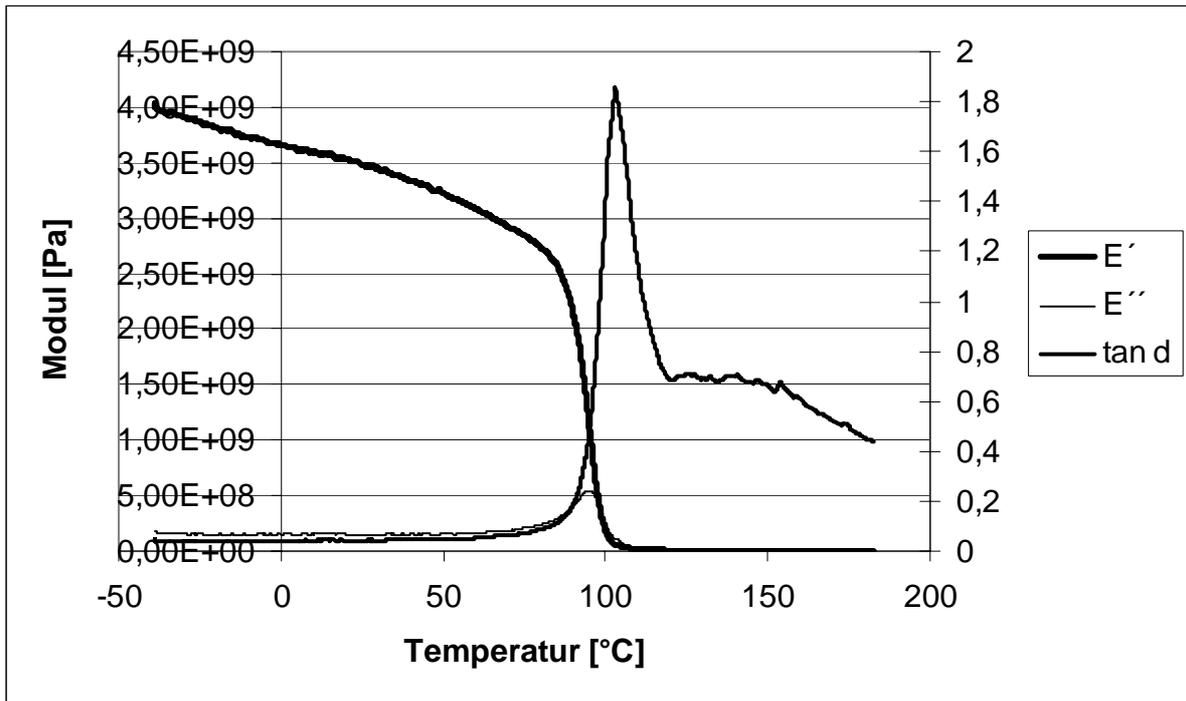


Abbildung 95: DMA-Diagramm der schwarzen Epoxy-Pulverlack-Probe NIR1-9270, thermisch

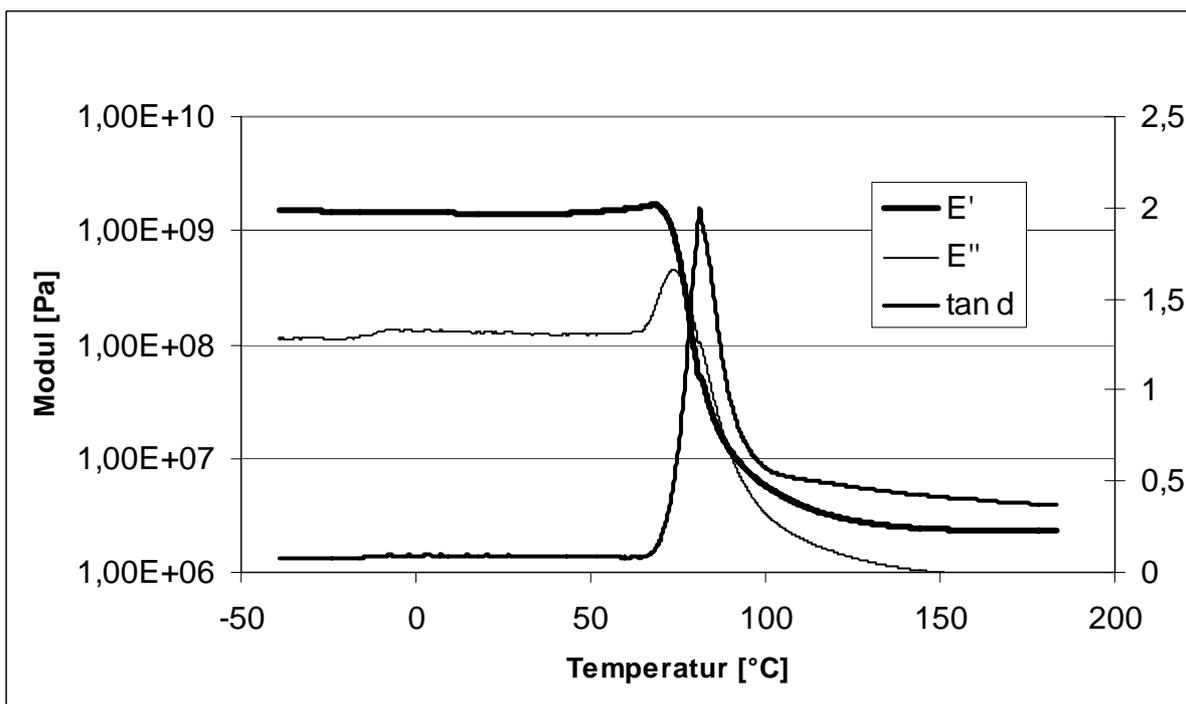


Abbildung 96: DMA-Diagramm der weißen Hybrid-Pulverlack-Probe NIR3-1113, NIR

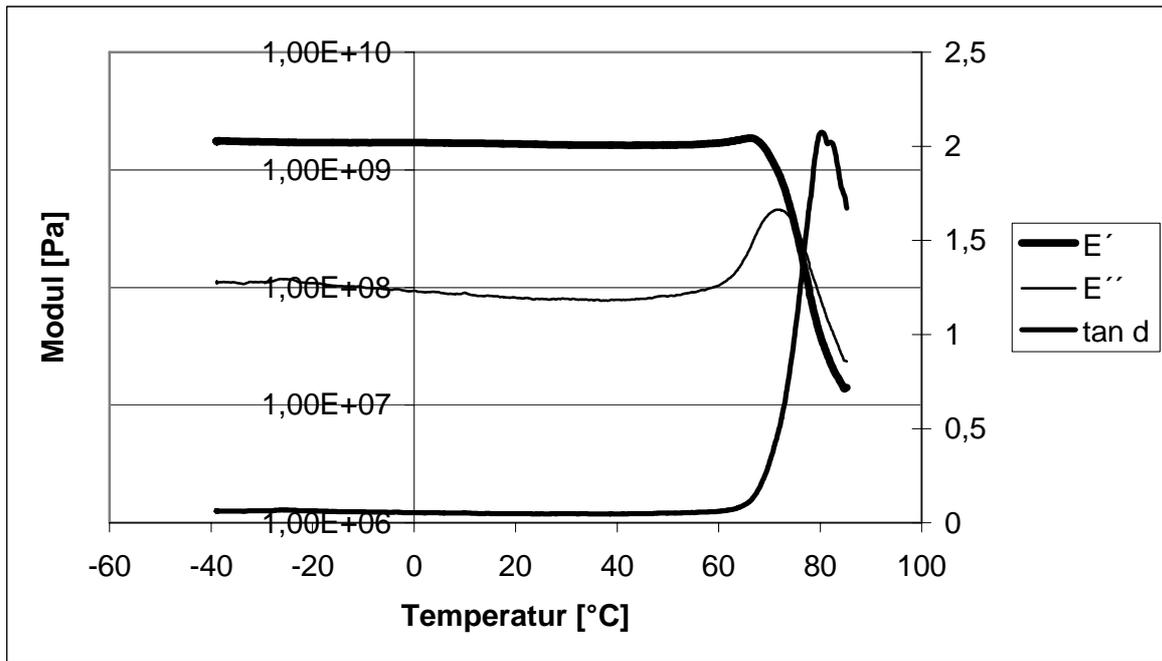


Abbildung 97: DMA-Diagramm der weißen Hybrid-Pulverlack-Probe NIR3-1113, thermisch

### 9.3 Operationalisierung

Unter Operationalisierung versteht man die Angabe, wie einem theoretischen Begriff beobachtbare Indikatoren zugeordnet werden [96].

In dieser Arbeit werden insgesamt 14 potentielle Erfolgsfaktoren ermittelt. Für diese wurden beobachtbare Indikatoren oder auch Variablen festgelegt. Im Folgenden soll ein Überblick der im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Erfolgsfaktoren und die dazugehörigen Variablen in Frageform gegeben werden.

Ein für eine Prozess-Innovation optimaler „Formaler Prozess“ sollte klar strukturierte Phasen und Meilensteine umfassen sowie klar formulierte Kriterien für Projektfortführung bzw. Projektabbruch und eine optimale Prozess-Steuerung aufweisen. Es wurden somit die in Tabelle 56 aufgeführten Variablen für den Erfolgsfaktor „Formaler Prozess“ bestimmt.

<u>Variablen des Erfolgsfaktors „Formaler Prozess“ (in Frageform)</u>
Die Einteilung in Phasen war klar strukturiert
Die Vorgaben für die Meilensteine waren klar strukturiert
Die Kriterien für Projektfortführung bzw. Projektabbruch waren unklar formuliert (Rev) <sup>23</sup>
Die Steuerung des Prozesses war optimal

**Tabelle 56: Fragen zum Themenkomplex „Formaler Prozess“ (in Anlehnung an Ernst [56] )**

Eine sehr gute Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase ist gekennzeichnet durch eine sehr gute erste grobe Bewertung von Ideen, eine herausragender Durchführung technischer und marktbezogener Machbarkeitsstudien, eine optimale kommerzielle Bewertung des Projektes vor Eintritt in die Entwicklungsphase sowie eine sehr gute Beschreibung sowohl des Prozesskonzeptes als auch des Zielmarktes. Daher wurden die in Tabelle 57 aufgelisteten Variablen für den Erfolgsfaktor „Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase“ festgelegt.

---

<sup>23</sup> Rev=Reverse, die Variable ist umgekehrt codiert

Variablen des Erfolgsfaktors „Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase“ (in Frageform)
Die erste grobe Bewertung von Ideen war optimal
Die Durchführung von technischen Machbarkeitsstudien war optimal
Die Durchführung von marktbezogenen Machbarkeitsstudien war optimal
Die kommerzielle Bewertung des Projektes vor Eintritt in die Entwicklungsphase war optimal
Die Beschreibung des Prozesskonzeptes war sehr schlecht (Rev)
Die Beschreibung des Zielmarktes war optimal

**Tabelle 57: Fragen zum Themenkomplex „Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase“ (in Anlehnung an Ernst [56] )**

Eine sehr gute geeignete, kommerzielle Bewertung des Projektes in seinem Verlauf bedeutet eine optimale Bewertung sowohl der Entwicklungs- und Fertigungskosten als auch der Vermarktungs- und Vertriebskosten während des gesamten Prozess-Verlaufs. Dies belegen die in Tabelle 58 ersichtlichen Variablen für den Faktor „Kommerzielle Bewertung des Projektes in seinem Verlauf“.

Variablen des Erfolgsfaktors „Kommerzielle Bewertung des Projektes in seinem Verlauf“ (in Frageform)
Die Bewertung der Entwicklungskosten während des Prozess-Verlaufs war optimal
Die Bewertung der Fertigungskosten während des Prozess-Verlaufs war sehr schlecht (Rev)
Die Bewertung der Vermarktungskosten während des Prozess-Verlaufs war optimal
Die Bewertung der Vertriebskosten während des Prozess-Verlaufs war optimal

**Tabelle 58: Fragen zum Themenkomplex „Kommerzielle Bewertung des Projektes in seinem Verlauf“ (in Anlehnung an Ernst [56] )**

Die „Orientierung des Prozesses an den Anforderungen des Marktes“ ist charakterisiert durch eine herausragende Marktforschung, eine optimale Prognose von Marktpotentialen sowie ausreichende Wettbewerbsbeobachtungen (s. Tabelle 59).

<u>Variablen des Erfolgsfaktors „Orientierung des Prozesses an den Anforderungen des Marktes“ (in Frageform)</u>
Die Marktforschung bzgl. der Erfassung und Bewertung von Kundenwünschen war optimal
Die Ergebnisse der Marktforschung bzgl. der Erfassung und Bewertung von Kundenwünschen wurden ausreichend aktualisiert
Die Prognosen von Marktpotentialen war sehr schlecht (Rev)
Die Prognosen von Marktpotentialen wurden ausreichend aktualisiert
Der Wettbewerb wurde ausreichend beobachtet
Die Ergebnisse der Wettbewerbsbeobachtungen wurden ausreichend aktualisiert

**Tabelle 59: Fragen zum Themenkomplex „Orientierung des Prozesses an den Anforderungen des Marktes“ (in Anlehnung an Ernst [56] )**

Der Themenkomplex „Kundeneinbindung“ umfasst einen intensiven Informationsaustausch mit dem Kunden, dem Kunden-Einbezug, die Vorgabe an das R&D-Team ständig während der Entwicklungstätigkeit Kontakt zu den Kunden zu halten, Kundenanforderungen als einen festen Bestandteil von Meilensteinüberprüfungen und als Prozess-Orientierung sowie wichtige Anregungen und Hilfestellungen von Kundenseite für die R&D-Aktivitäten. Damit ergeben sich die in Tabelle 60 aufgeführten Variablen des Erfolgsfaktors „Kundeneinbindung“.

<u>Variablen des Erfolgsfaktors „Kundeneinbindung“ (in Frageform)</u>
Während des Prozesses fand ein intensiver Informationsaustausch mit dem Kunden statt
Kunden wurden nicht, bevor größere R&D Aktivitäten erfolgten, in den Prozess einbezogen (Rev)
Es gab die Vorgabe an das R&D Team ständig während der Entwicklungstätigkeit Kontakt zu den Kunden zu halten
Kundenanforderungen waren ein fester Bestandteil von Meilensteinüberprüfungen
Der Prozess orientierte sich in seinem gesamten Verlauf stark an den Kundenanforderungen
Die Kunden gaben wichtige Anregungen für die R&D Aktivitäten
Die Kunden gaben wichtige Hilfestellungen, um die bei den R&D Aktivitäten auftretenden Probleme zu lösen

**Tabelle 60: Fragen zum Themenkomplex „Kundeneinbindung“ (in Anlehnung an Ernst [56] )**

Laut den Telefon-Gesprächen enthielten die multifunktional zusammengesetzten Prozess-Teams beider untersuchten Technologien Team-Mitglieder sowohl aus dem Mar-

keting- als auch aus dem R&D- sowie aus dem Verfahrenstechnik-Bereich. Dies zeigen die in Tabelle 61 aufgelisteten Variablen für den Erfolgsfaktor „Multifunktional zusammengesetztes Prozess-Team“.

<u>Variablen des Erfolgsfaktors „Multifunktional zusammengesetztes Prozess-Team“ (in Frageform)</u>
Es waren im Prozess-Team genügend Teammitglieder aus dem Marketing vorhanden
Es waren im Prozess-Team genügend Teammitglieder aus dem R&D Bereich vorhanden
Es waren im Prozess-Team genügend Teammitglieder aus der Verfahrenstechnik vorhanden

**Tabelle 61: Fragen zum Themenkomplex „Multifunktional zusammengesetztes Prozess-Team“ (in Anlehnung an Ernst [56] )**

Der Erfolgsfaktor „Einsatz und Engagement des Projektleiters und der Teammitglieder“ umfasst einen engagierten Projektleiter und Team-Mitglieder sowie häufige Team-Treffen und gut verfügbare Team-Mitglieder in räumlicher Nähe (s. Tabelle 62).

<u>Variablen des Erfolgsfaktors „Einsatz und Engagement des Projektleiters und der Teammitglieder“ (in Frageform)</u>
Der Projektleiter war engagiert
Es fanden häufig Team-Meetings statt
Die Teammitglieder aus dem Verfahrenstechnikbereich waren nicht engagiert (Rev)
Die Teammitglieder aus dem R&D Bereich waren engagiert
Die Teammitglieder aus dem Marketing Bereich waren engagiert
Alle Teammitglieder befanden sich in räumlicher Nähe
Alle Teammitglieder waren gut verfügbar

**Tabelle 62: Fragen zum Themenkomplex „Einsatz und Engagement des Projektleiters und der Teammitglieder“ (in Anlehnung an Ernst [56] )**

Eine optimale Kommunikation bedeutet leicht erreichbare und sofort ansprechbare Mitarbeiter. Daher wurden die in Tabelle 63 aufgeführten Variablen für den Erfolgsfaktor „Kommunikation“ bestimmt.

<u>Variablen des Erfolgsfaktors „Kommunikation“ (in Frageform)</u>
Es ist kein Problem Mitarbeiter aus anderen Bereichen sofort anzusprechen, wenn die Notwendigkeit dazu besteht
Mitarbeiter aus meinem Bereich sind für Personen aus anderen Bereichen leicht zu erreichen
Während des Projektes war die Kommunikation zwischen den Teammitgliedern innerhalb meines Bereichs (Marketing, R&D oder Produktion) sehr schlecht (Rev)
Während des Projektes war die Kommunikation mit den Teammitgliedern der anderen Bereiche sehr gut

**Tabelle 63: Fragen zum Themenkomplex „Kommunikation“ (in Anlehnung an Ernst [56] und Ebadi/Utterback [97] )**

Der Erfolgsfaktor „Unternehmensleitung“ ist charakterisiert durch klar definierte Projekt-Ziele seitens der Unternehmensleitung, die regelmäßig überprüft werden, mit monetären Anreizen verbunden sind und ausreichend kommuniziert werden (s. Tabelle 64).

<u>Variablen des Erfolgsfaktors „Unternehmensleitung“ (in Frageform)</u>
Von der Unternehmensleitung wurden klare Ziele für das Projekt definiert
Die Erreichung dieser Ziele wurde nicht regelmäßig von der Unternehmensleitung überprüft (Rev)
Die Erreichung dieser Ziele waren mit monetären Anreizen verbunden
Die Unternehmensleitung hat diese Zielvorgaben ausreichend kommuniziert

**Tabelle 64: Fragen zum Themenkomplex „Unternehmensleitung“ (in Anlehnung an Ernst [56] )**

Die Ressourcenausstattung umfasst finanzielle und personelle Ressourcen, daher wurden die folgenden Variablen (s. Tabelle 65) für den Erfolgsfaktor „Ressourcenausstattung“ bestimmt.

<u>Variablen des Erfolgsfaktors „Ressourcenausstattung“ (in Frageform)</u>
Die finanziellen Ressourcen waren mehr als angemessen für dieses Projekt
Die personellen Ressourcen waren mehr als angemessen für dieses Projekt
Die Personen dieses Projektes waren mehr als angemessen geeignet für dieses Projekt

**Tabelle 65: Fragen zum Themenkomplex „Ressourcenausstattung“ (in Anlehnung an Ernst [56] )**

Die sog. Kontingenzfaktoren oder auch Umweltfaktoren setzen sich zusammen aus den Erfolgsfaktoren „Marktdynamik“, „Wettbewerbsintensität“ und „Technologiedynamik“. Die entsprechenden Variablen sind den folgenden Tabellen zu entnehmen.

<u>Variablen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ (in Frageform)</u>
In unserer Branche verändern sich die Kundenanforderungen im zeitlichen Verlauf sehr stark
Die Kunden unserer Branche wünschen fortwährend neue Produkte
Es kamen Nachfragen von Kunden , die nie zuvor Kunden von uns waren
Neue Kunden neigen dazu, Produkthanforderungen zu haben, die von denen bisheriger Kunden abweichen.
Wir beliefern hauptsächlich Kunden, die schon seit Jahren unsere Kunden sind (Rev)

**Tabelle 66: Fragen zum Themenkomplex „Marktdynamik“ (in Anlehnung an Ernst [56] und Jaworski/Kohli [98] )**

<u>Variablen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsintensität“ (in Frageform)</u>
Der Wettbewerb in unserer Branche ist schwach (Rev.)
Alle Produkte/Prozesse, die eine Firma anbietet, kann vom Wettbewerb sofort auch angeboten werden
Ein harter Preiswettbewerb ist in unserer Branche üblich
Fast täglich gibt es Meldungen über neue Aktivitäten des Wettbewerbs
Unserer Wettbewerber sind sehr stark

**Tabelle 67: Fragen zum Themenkomplex „Wettbewerbsintensität“ (in Anlehnung an Ernst [56] und Jaworski/Kohli [98] )**

<u>Variablen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ (in Frageform)</u>
Die Technologien in unserer Branche verändern sich sehr langsam (Rev)
Technologische Veränderungen eröffnen große Chancen in unserer Branche
Es ist sehr schwer eine Vorhersage zu machen, wo unsere Branche in einigen Jahren technologisch stehen wird.
Die meisten Neuprodukte/-prozesse sind in unserer Branche erst durch technologische Durchbrüche ermöglicht worden
Wichtige technologische Veränderungen kommen in unserer Branche sehr oft vor

**Tabelle 68: Fragen zum Themenkomplex „Technologiedynamik“ (in Anlehnung an Ernst [56] und Jaworski/Kohli [98] )**

Hinsichtlich des Erfolgsfaktors „Innovationsgrad“ wurden die in Tabelle 69 aufgelisteten Variablen festgelegt.

Variablen des Erfolgsfaktors „Innovationsgrad“ (in Frageform)
Die Innovation war bei ihrer Einführung eine revolutionäre Innovation
Die Innovation war bei ihrer Einführung eine inkrementale Innovation (Rev)
Die Innovation war bei ihrer Einführung eine Basis-Innovation

**Tabelle 69: Fragen zum Themenkomplex „Innovationsgrad“**

Die Variablen des Erfolgsfaktors "Kooperation" sind in der Tabelle 70 zusammengestellt.

Variablen des Erfolgsfaktors „Kooperation“ (in Frageform)
Die von uns praktizierte Kooperationsform war sehr geeignet, um die Innovation "X" voranzubringen
Die Kooperation mit mehreren verschiedenen Strahler-Herstellern ist besser geeignet Innovationen voranzubringen als die ausschließliche Kooperation mit einem Strahler- Hersteller
Eine feste vertragliche Kooperation ist ungeeigneter als eine lose Kooperation
Die Zusammenarbeit mit den Strahler- Herstellern war optimal

**Tabelle 70: Fragen zum Themenkomplex "Kooperation"**

## 9.4 Die Ausprägungen der Erfolgsfaktoren

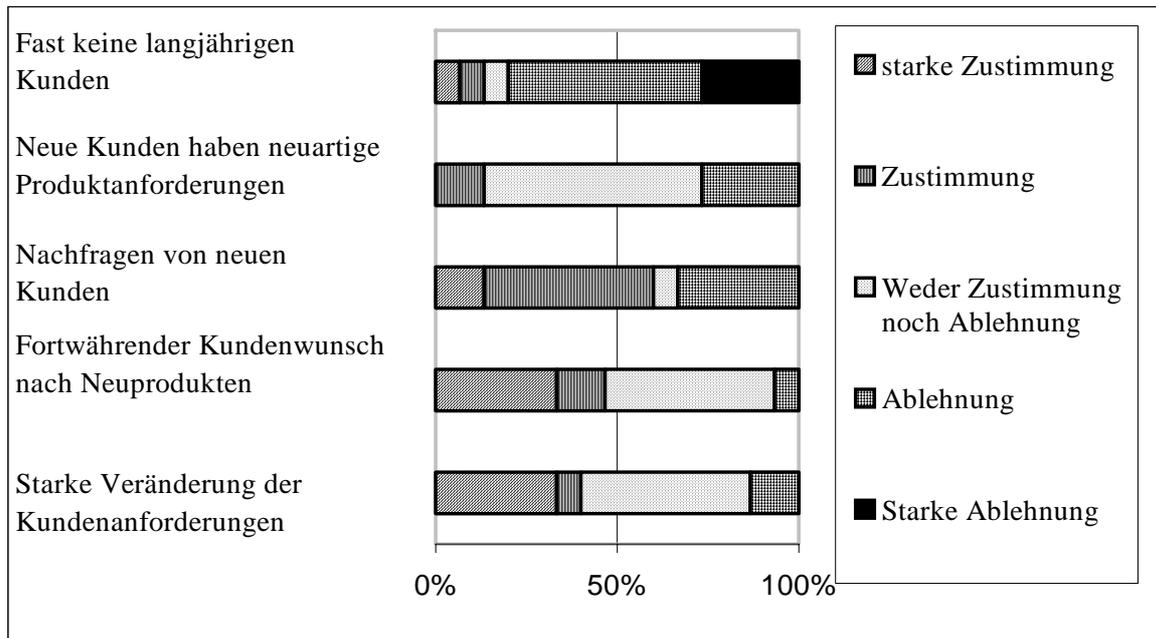


Abbildung 98: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche IR-Technologie“

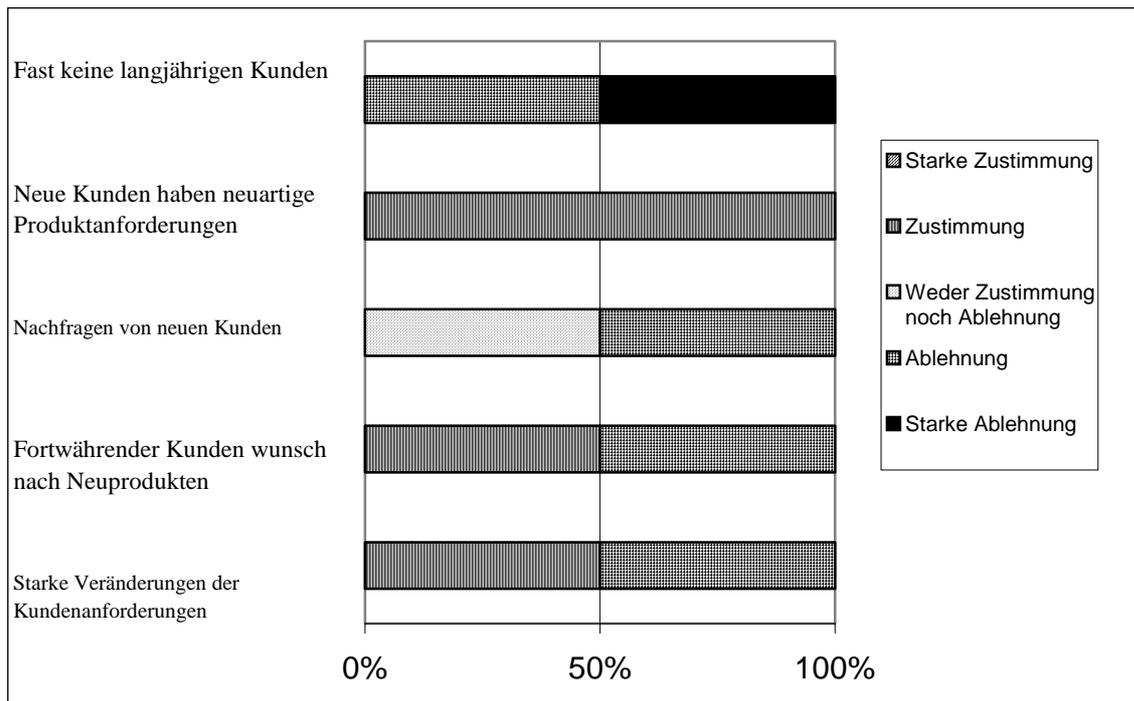
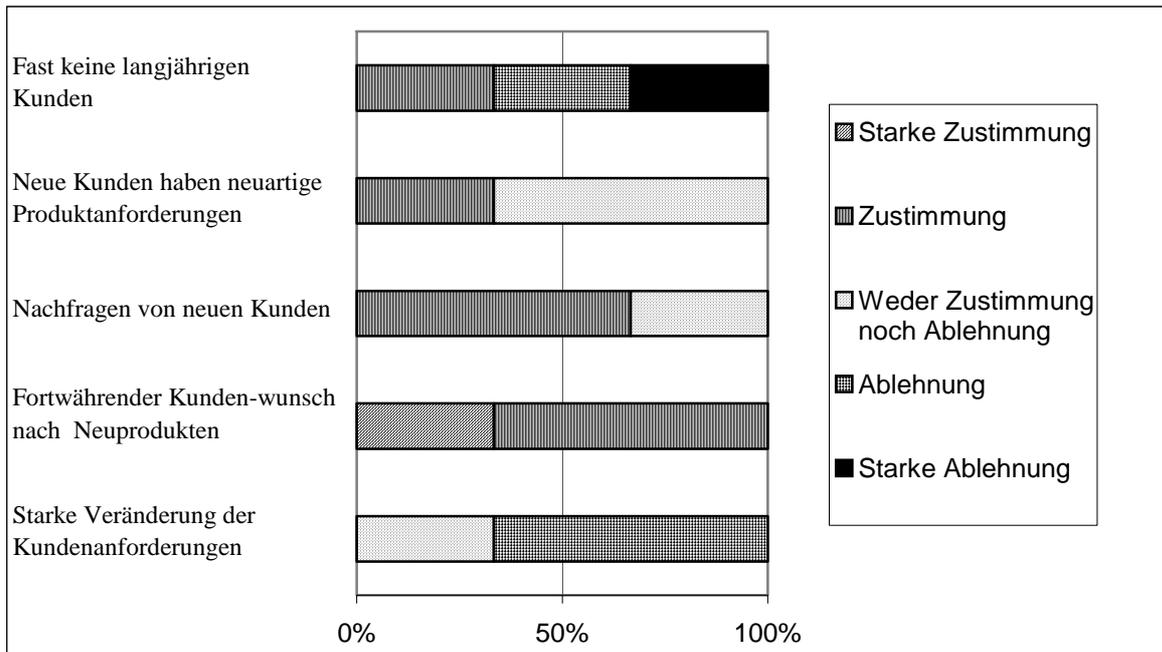
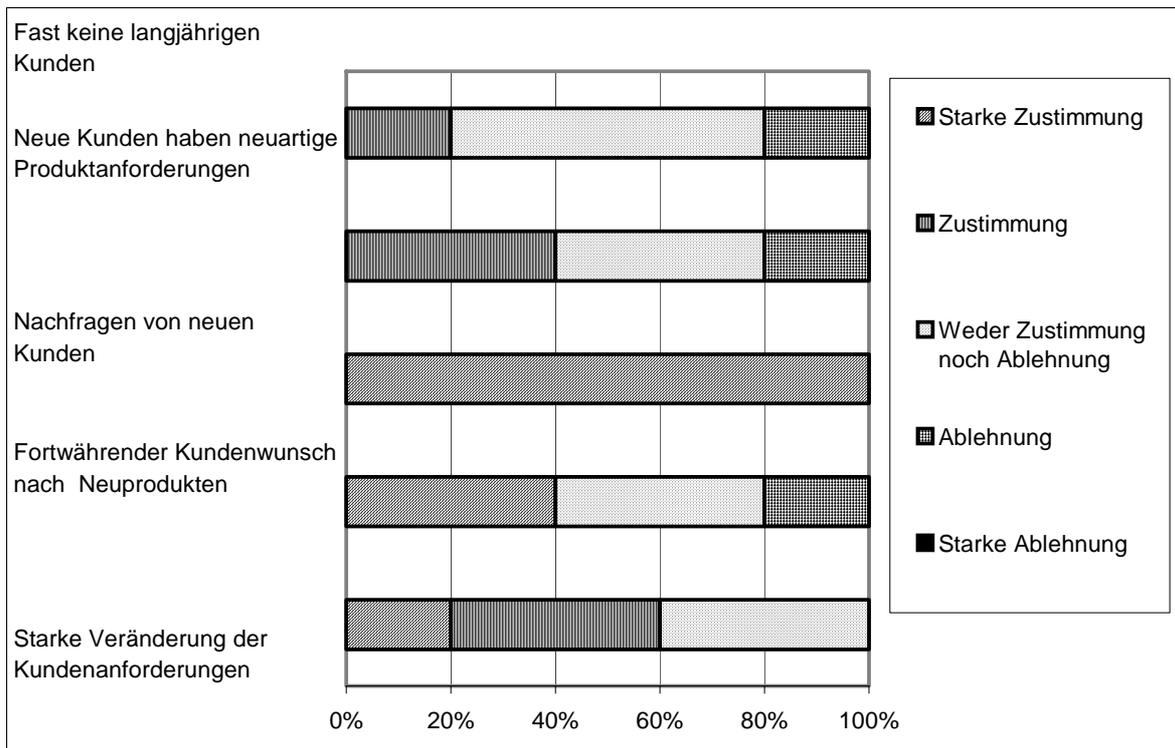


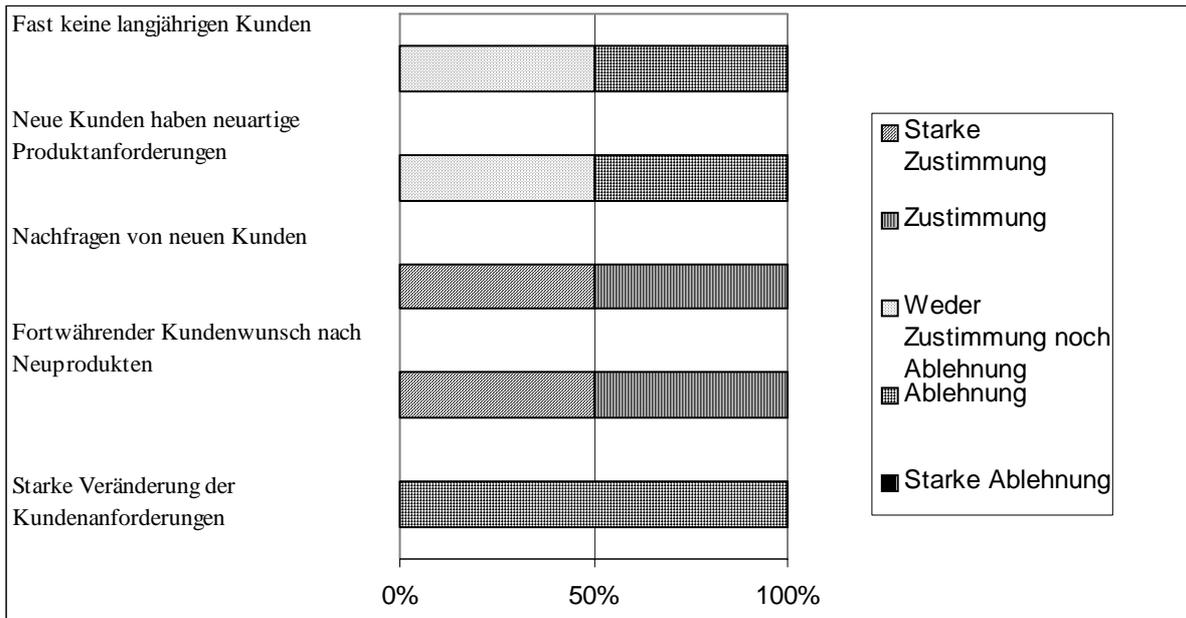
Abbildung 99: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische IR-Technologie“



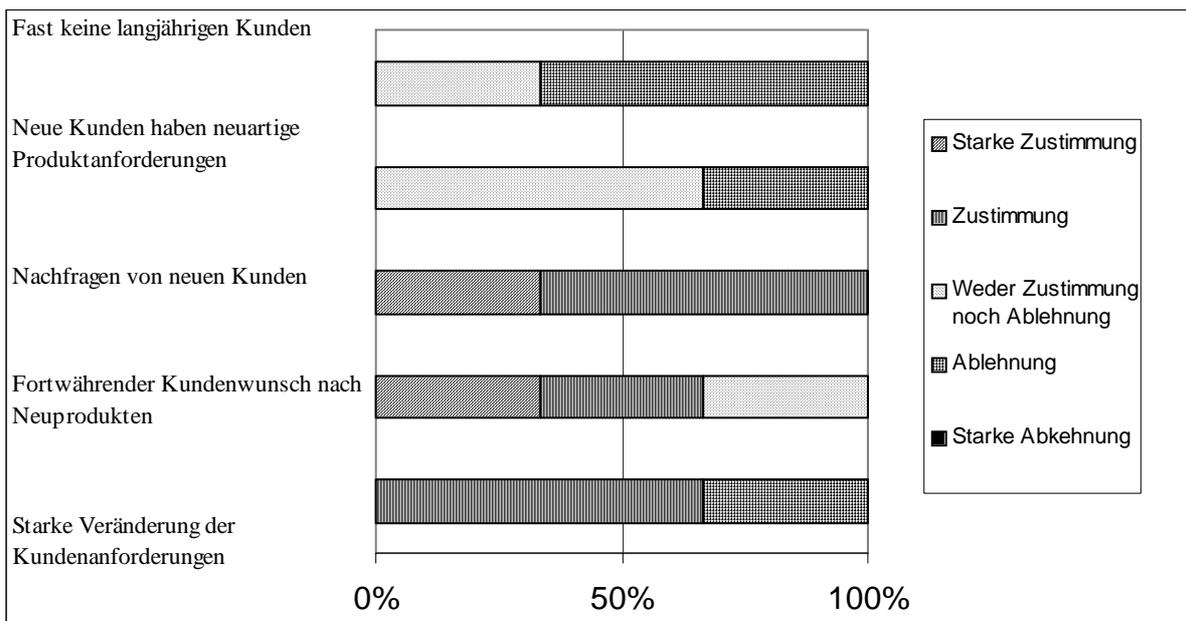
**Abbildung 100: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische IR-Technologie“**



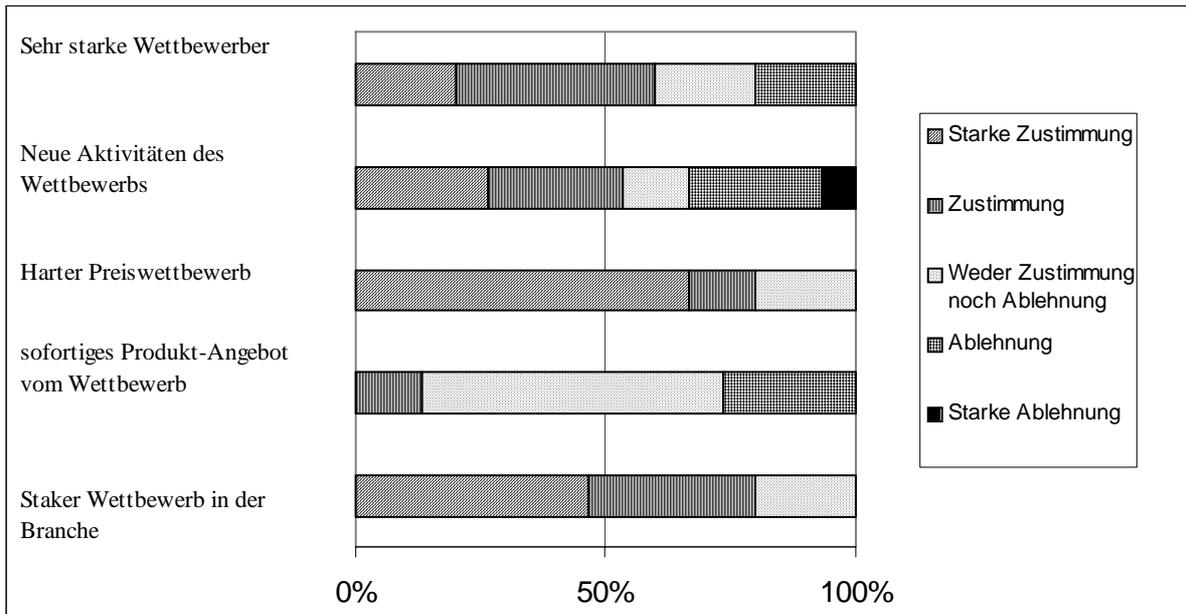
**Abbildung 101: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche NIR-Technologie“**



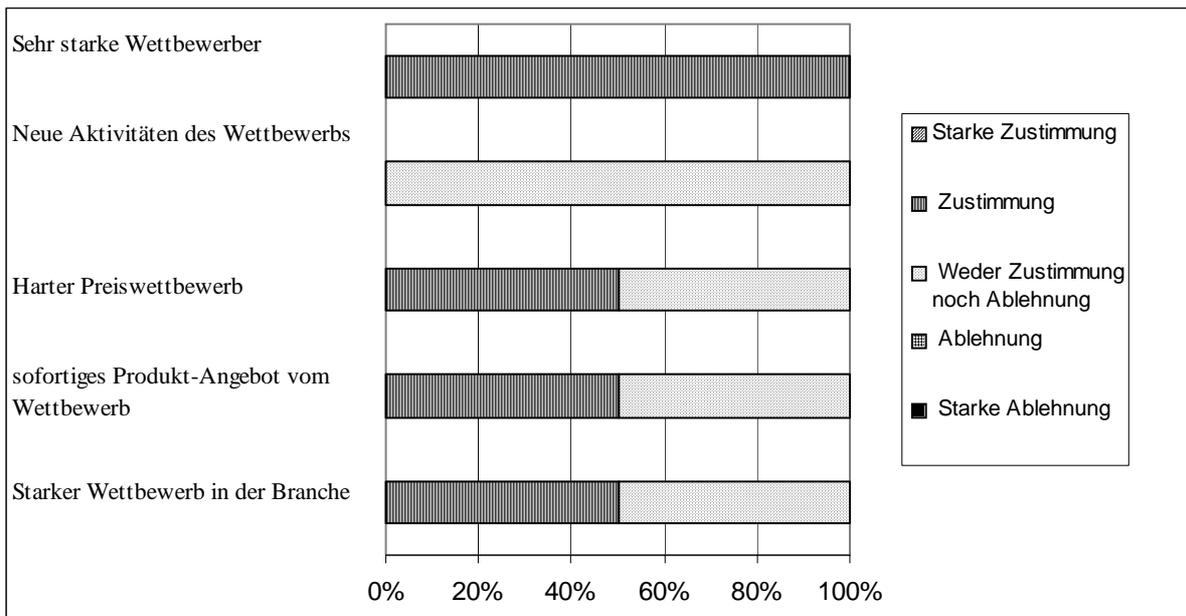
**Abbildung 102: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische NIR-Technologie“**



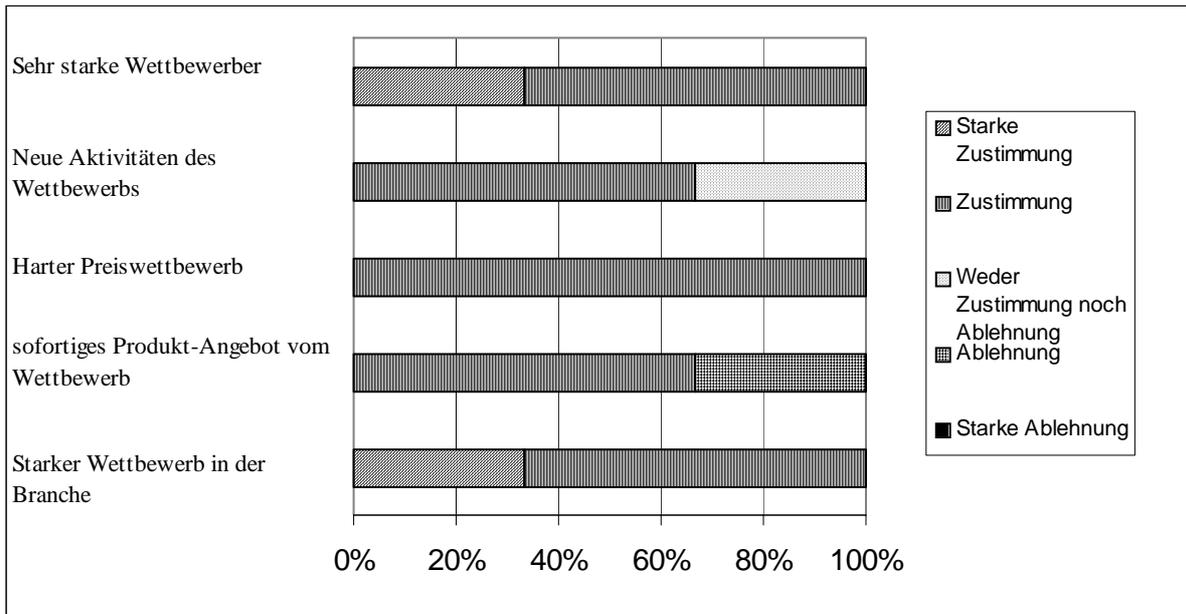
**Abbildung 103: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische NIR-Technologie“**



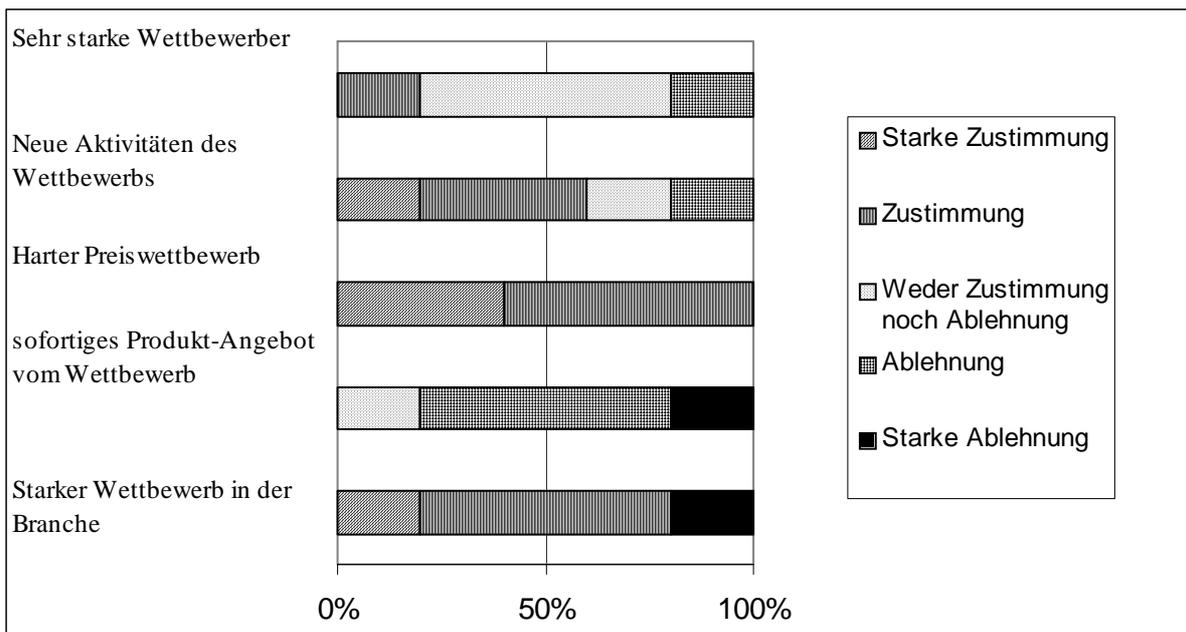
**Abbildung 104: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche IR-Technologie“**



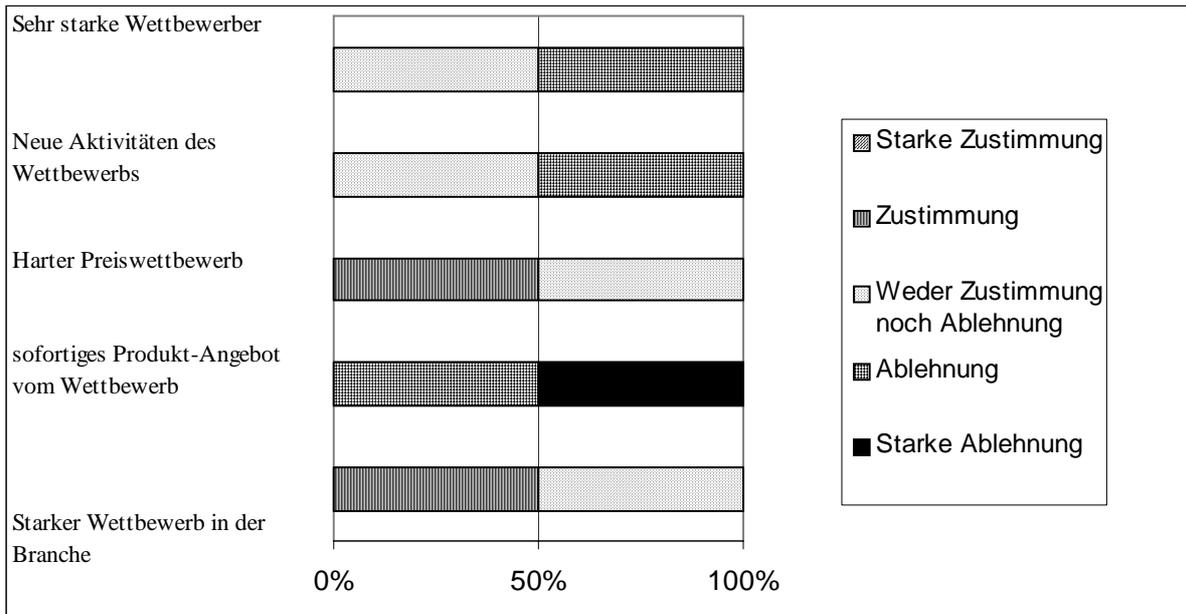
**Abbildung 105: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische IR-Technologie“**



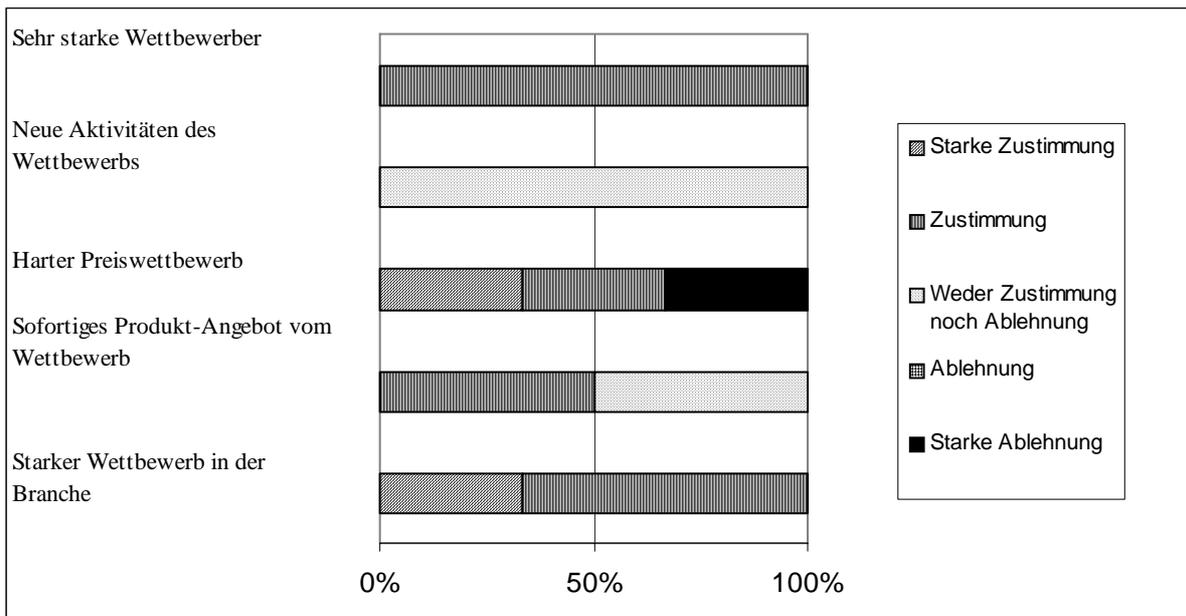
**Abbildung 106:** Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische IR-Technologie“



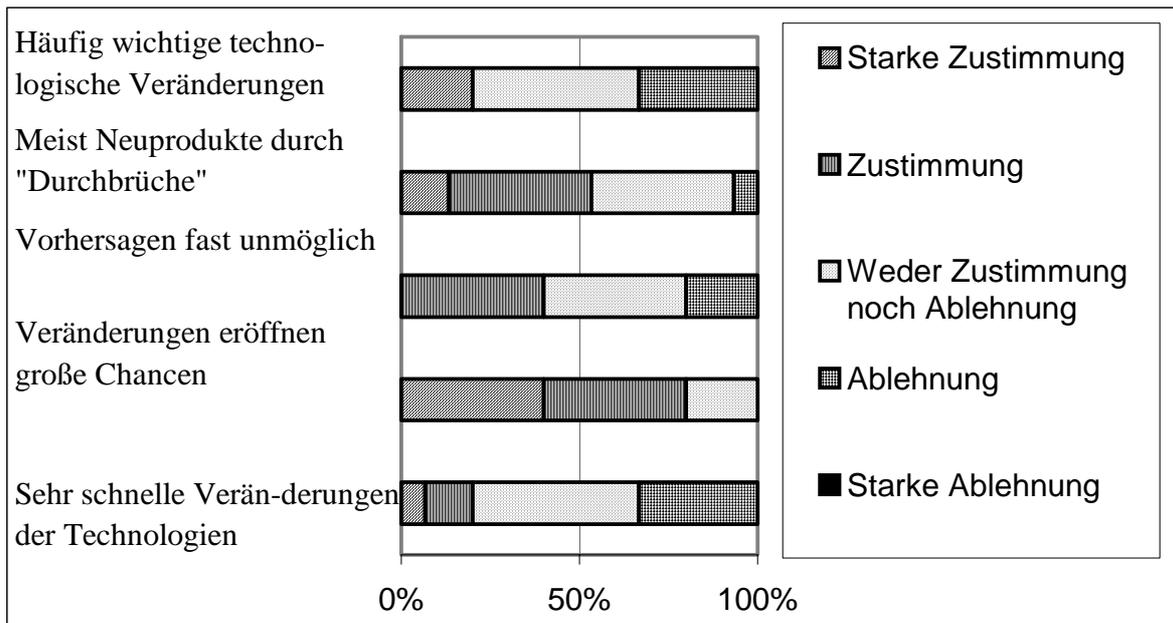
**Abbildung 107:** Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche NIR-Technologie“



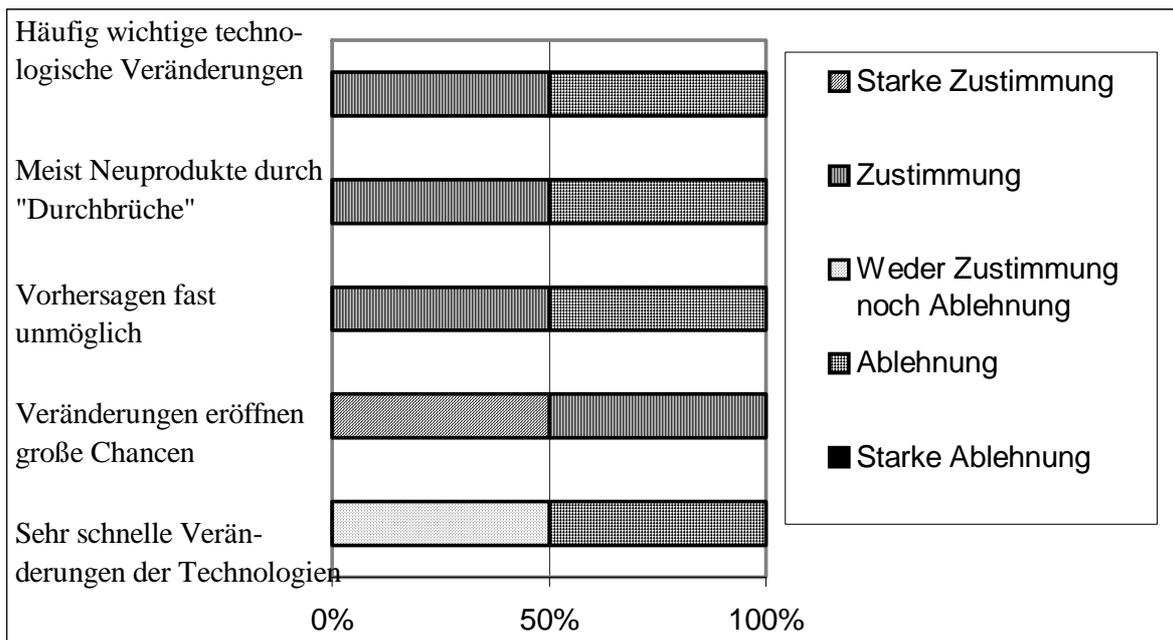
**Abbildung 108: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische NIR-Technologie“**



**Abbildung 109: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische NIR-Technologie“**



**Abbildung 110: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche IR-Technologie“**



**Abbildung 111: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische IR-Technologie“**

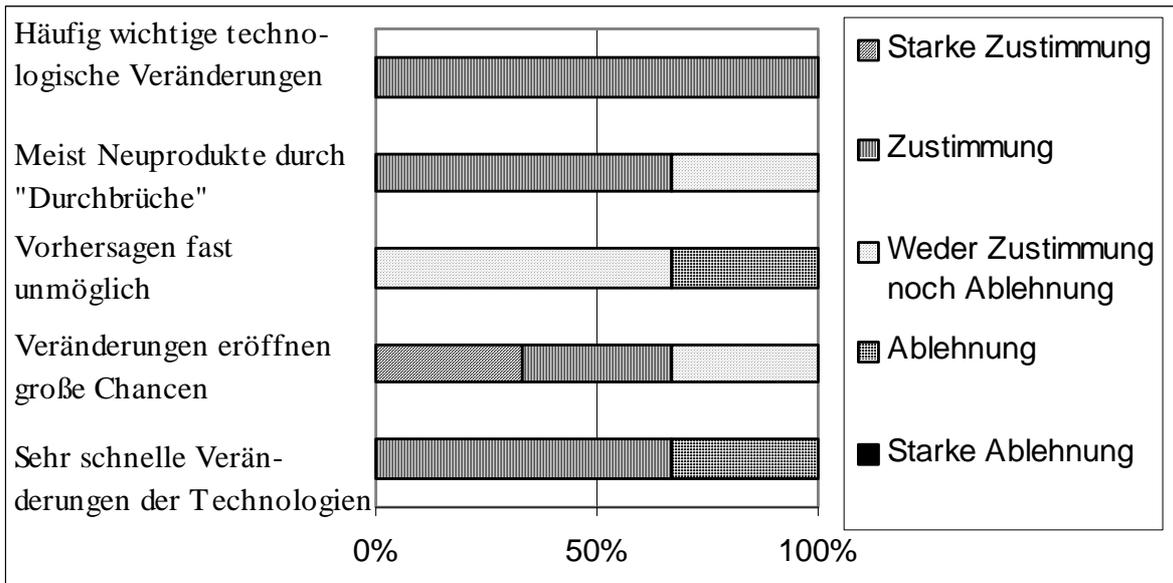


Abbildung 112: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische IR-Technologie“

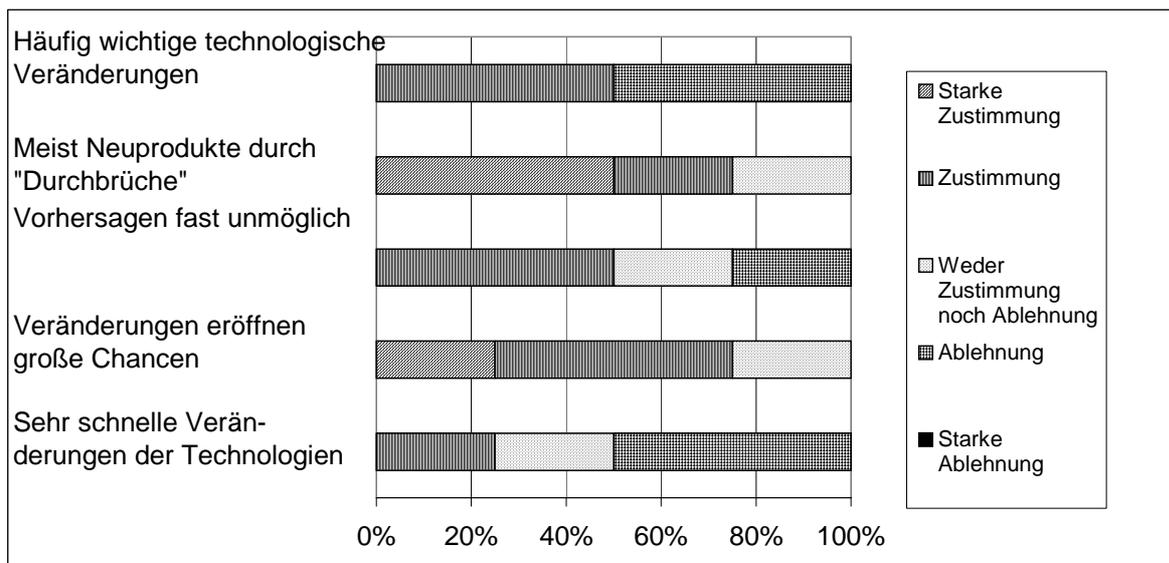
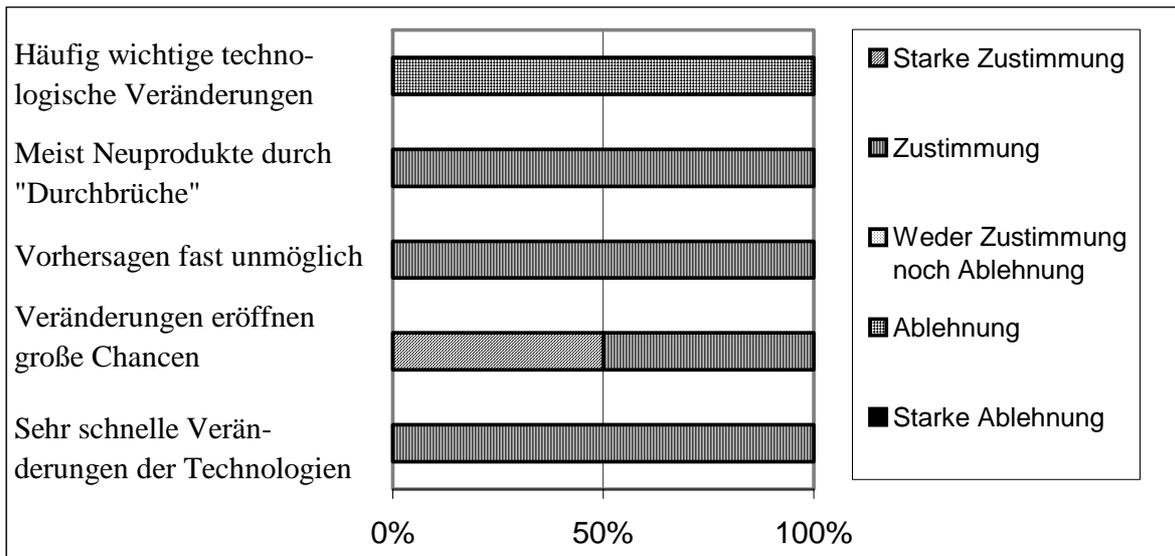
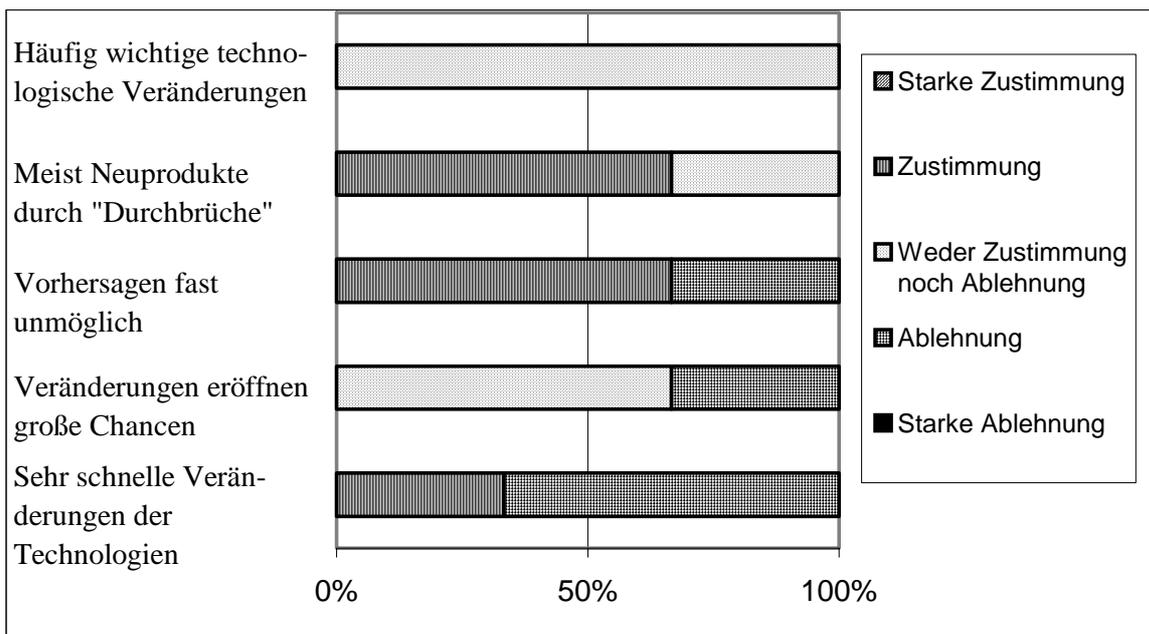


Abbildung 113: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche NIR-Technologie“



**Abbildung 114:** Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische NIR-Technologie“



**Abbildung 115:** Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische NIR-Technologie“

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur der Bisphenol A-Epoxidharze [7] .....	12
Abbildung 2: Mögliche Reaktionen Epoxidharz-Härter (in Anlehnung an Stoye/Freitag [7] ) .....	13
Abbildung 3: Reaktionsgleichung der Umsetzung carboxysäurefunktionaler Polyesterharze mit Epoxidharzen (Hybridsysteme).....	14
Abbildung 4: : Struktur des Triglycidylisocyanurats (TGIC) [8] .....	14
Abbildung 5: Pulverlackhärtung durch Einwirkung von Triglycidylisocyanurat bzw. aromatischen Polycarbonsäure-Glycidylestern auf sauren Polyester .....	14
Abbildung 6: Pulverlackhärtung durch Einwirkung von Hydroxyalkylamidhärter auf sauren Polyester.....	15
Abbildung 7: Vernetzung von hydroxylfunktionellen Polyesterharzen oder hydroxylfunktionellen Acrylatharzen mit Isocyanaten zu Polyurethan[9] .....	15
Abbildung 8: Struktur des Isophorondiisocyanats [2] [10] .....	15
Abbildung 9: Umsetzung von epoxyfunktionellem Acrylatharz mit Dodecandicarbonsäure	16
Abbildung 10: Prinzip des Korona-Verfahrens [2] .....	18
Abbildung 11: Prinzip des triboelektrischen Verfahrens [2] .....	19
Abbildung 12: Der Viskositätsverlauf von einigen verschiedenen Pulverlacksystemen in Abhängigkeit von der Einbrennzeit [2].....	20
Abbildung 13: Ringöffnung der Epoxy-Gruppe mit einer Carboxyl-Gruppe Alkohols [12] ..	21
Abbildung 14: Reaktion der entstandenen Esterverbindung mit einer Carboxyl-Gruppe [12]	21
Abbildung 15: Reaktion der entstandenen Esterverbindung mit einer Epoxy-Gruppe [12] ....	22
Abbildung 16: Hydrolyse der Epoxy-Gruppe [12] .....	22
Abbildung 17: Reaktion von quartären Phosphonium-Verbindungen zu Alkenen (Wittig- Reaktion) [18] .....	23
Abbildung 18: Harmonisches Oszillieren eines Maxwell-Elements. Die durchgezogene Linie steht für die Spannungskurve, die gestrichelte Linie für die Dehnungskurve [6] .....	33
Abbildung 19: Prinzipieller Aufbau eines Fourier-Transform-Infrarot-Spektrometers [50] ...	38
<b>Abbildung 20: Vergleichende Übersicht der Gelzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern bei 185°C .....</b>	<b>39</b>
Abbildung 21: Vergleichende Übersicht der Gelzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern bei 215°C .....	40
Abbildung 22: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Pulver.....	46
Abbildung 23: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, thermisch ausgehärtet .....	46
Abbildung 24: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Superburn Emitter 100% .....	47
Abbildung 25: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Superburn Emitter 50% .....	47
Abbildung 26: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Highburn Emitter 100% .....	48
Abbildung 27: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Highburn Emitter 50% .....	48
Abbildung 28: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Normalburn Emitter 100% ..	49
Abbildung 29: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR3-1113, Normalburn Emitter 50% ....	49
Abbildung 30: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, Pulver.....	50
Abbildung 31: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, thermisch ausgehärtet .....	50
Abbildung 32: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, Highburn Emitter 100% .....	51
Abbildung 33: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, Highburn Emitter 50% .....	51

Abbildung 34: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, Normalburn Emitter 100% ..	52
Abbildung 35: Infrarot-Spektrum des Pulverlacks NIR1-9270, Normalburn Emitter 50% ....	52
Abbildung 36: Ansicht der Strahlungseinheit der verwendeten NIR-Anlage.....	59
Abbildung 37: Bestimmung der Glasübergangstemperatur aus dem Schnittpunkt der Winkelhalbierenden mit der DDK-Kurve <sup>[54]</sup> .....	64
Abbildung 38: Modell kultureller Kongruenz für Organisationen nach Cameron/Freeman <sup>[78]</sup> .....	76
Abbildung 39: Mögliche Einflussfaktoren des Erfolgs einer Verfahrensinnovation im Lackaushärtungsbereich.....	83
Abbildung 40: Prinzipieller Aufbau des Forschungsdesigns .....	84
Abbildung 41: Erfolgs- und Umweltfaktoren einer Verfahrensinnovation auf dem Gebiet der Lackaushärtung .....	112
Abbildung 42: Die Variablen der externen Erfolgsfaktoren .....	112
Abbildung 43: Die Variablen der Erfolgsfaktoren „Formaler Prozess“ und „Innovationsgrad“ .....	113
Abbildung 44: Die Kontingenzfaktoren des deutschen, französischen und US-amerikanischen Lackmarktes in verdichteter Form .....	114
Abbildung 45: DSC-Aufnahme F58-1, Pulver.....	121
Abbildung 46: DSC-Aufnahme F58-2, Pulver.....	122
Abbildung 47: DSC-Aufnahme F58-3, Pulver.....	122
Abbildung 48: DSC-Aufnahme F58-4, Pulver.....	123
Abbildung 49: DSC-Aufnahme F58-5, Pulver.....	123
Abbildung 50: DSC-Aufnahme F58-6, Pulver.....	124
Abbildung 51: DSC-Aufnahme F58-7, Pulver.....	124
Abbildung 52: DSC-Aufnahme F58-8, Pulver.....	125
Abbildung 53: DSC-Aufnahme F58-9, Pulver.....	125
Abbildung 54: DSC-Aufnahme F58-10, Pulver.....	126
Abbildung 55: DSC-Aufnahme F58-11, Pulver.....	126
Abbildung 56: DSC-Aufnahme F58-12, Pulver.....	127
Abbildung 57: DSC-Aufnahme F58-13, Pulver.....	127
Abbildung 58: DSC-Aufnahme F58-2, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter- Lackoberfläche, 20 mm/s.....	129
Abbildung 59: DSC-Aufnahme F58-2, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter- Lackoberfläche, 21 mm/s.....	129
Abbildung 60: DSC-Aufnahme F58-3, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter- Lackoberfläche, 22 mm/s.....	130
Abbildung 61: DSC-Aufnahme F58-3, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter- Lackoberfläche, 23 mm/s.....	130
Abbildung 62: DSC-Aufnahme F58-4, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter- Lackoberfläche, 23 mm/s.....	131
Abbildung 63: DSC-Aufnahme F58-4, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter- Lackoberfläche, 24 mm/s.....	131
Abbildung 64: DSC-Aufnahme F58-5, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter- Lackoberfläche, 25 mm/s.....	132
Abbildung 65: DSC-Aufnahme F58-5, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter- Lackoberfläche, 26 mm/s.....	132
Abbildung 66: DSC-Aufnahme F58-6, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter- Lackoberfläche, 27 mm/s.....	133
Abbildung 67: DSC-Aufnahme F58-6, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter- Lackoberfläche, 28 mm/s.....	133

Abbildung 68: DSC-Aufnahme F58-7, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 29 mm/s .....	134
Abbildung 69: DSC-Aufnahme F58-7, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 30 mm/s .....	134
Abbildung 70: DSC-Aufnahme F58-8, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 21 mm/s .....	135
Abbildung 71: DSC-Aufnahme F58-8, NB-Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 22 mm/s .....	135
Abbildung 72: DSC-Aufnahme F58-9, NB-Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 24 mm/s .....	136
Abbildung 73: DSC-Aufnahme F58-9, NB-Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 25 mm/s .....	136
Abbildung 74: DSC-Aufnahme F58-10, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 26 mm/s .....	137
Abbildung 75: DSC-Aufnahme F58-10, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 27 mm/s .....	137
Abbildung 76: DSC-Aufnahme F58-11, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 22 mm/s .....	138
Abbildung 77: DSC-Aufnahme F58-11, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 23 mm/s .....	138
Abbildung 78: DSC-Aufnahme F58-12, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 25 mm/s .....	139
Abbildung 79: DSC-Aufnahme F58-12, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 26 mm/s .....	139
Abbildung 80: DSC-Aufnahme F58-13, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 27 mm/s .....	140
Abbildung 81: DSC-Aufnahme F58-13, NB Emitter, 100% Leistung, 5cm Abstand Emitter-Lackoberfläche, 28 mm/s .....	140
Abbildung 82: DSC-Aufnahme des NIR3-1113 Pulvers .....	141
Abbildung 83: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (NB, 100%, 5 cm, 30 mm/s).....	141
Abbildung 84: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (NB, 50%, 5 cm, 15 mm/s).....	142
Abbildung 85: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (HB, 100%, 5 cm, 60 mm/s).....	142
Abbildung 86: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (HB, 50%, 5 cm, 30 mm/s).....	143
Abbildung 87: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (SB, 100%, 5 cm, 120 mm/s).....	143
Abbildung 88: DSC-Aufnahme des NIR3-1113-Lacks (SB, 50%, 5 cm, 60 mm/s).....	144
Abbildung 89: DSC-Aufnahme NIR1-9270 Pulver .....	144
Abbildung 90: DSC-Aufnahme des NIR1-9270-Lacks (NB, 100%, 5 cm, 70 mm/s).....	145
Abbildung 91: DSC-Aufnahme des NIR1-9270-Lacks (NB, 50%, 5 cm, 35 mm/s).....	145
Abbildung 92: DSC-Aufnahme des NIR1-9270-Lacks (HB, 100%, 5 cm, 150 mm/s).....	146
Abbildung 93: DSC-Aufnahme des NIR1-9270-Lacks (HB, 50%, 5 cm, 80 mm/s).....	146
Abbildung 94: DMA-Diagramm der schwarzen Epoxy-Pulverlack-Probe NIR1-9270, NIR 147	
Abbildung 95: DMA-Diagramm der schwarzen Epoxy-Pulverlack-Probe NIR1-9270, thermisch .....	148
Abbildung 96: DMA-Diagramm der weißen Hybrid-Pulverlack-Probe NIR3-1113, NIR....	148
Abbildung 97: DMA-Diagramm der weißen Hybrid-Pulverlack-Probe NIR3-1113, thermisch .....	149
Abbildung 98: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche IR-Technologie“ .....	157
Abbildung 99: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische IR-Technologie“ .....	157

Abbildung 100: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische IR-Technologie“ .....	158
Abbildung 101: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche NIR-Technologie“ .....	158
Abbildung 102: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische NIR-Technologie“ .....	159
Abbildung 103: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Marktdynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische NIR-Technologie“ .....	159
Abbildung 104: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche IR-Technologie“ .....	160
Abbildung 105: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische IR-Technologie“ .....	160
Abbildung 106: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische IR-Technologie“ .....	161
Abbildung 107: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche NIR-Technologie“ .....	161
Abbildung 108: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische NIR-Technologie“ .....	162
Abbildung 109: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Wettbewerbsdynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische NIR-Technologie“ .....	162
Abbildung 110: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche IR-Technologie“ .....	163
Abbildung 111: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische IR-Technologie“ .....	163
Abbildung 112: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische IR-Technologie“ .....	164
Abbildung 113: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „Deutsche NIR-Technologie“ .....	164
Abbildung 114: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „Französische NIR-Technologie“ .....	165
Abbildung 115: Ausprägungen des Erfolgsfaktors „Technologiedynamik“ in der Untersuchungseinheit „US-amerikanische NIR-Technologie“ .....	165

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick über die duromeren Pulverlackssysteme [2].....	11
Tabelle 2: Typische Leistungen der verschiedenen Emitter-Typen.....	27
Tabelle 3: Bestimmung der Reaktionsenthalpien der Pulver mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern.....	41
Tabelle 4: Einbrennparameter bei der Ermittlung von Mindestbetrahlzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern (ausgehärtet) .....	42
Tabelle 5: Glasübergangstemperatur (gemessen mittels DSC) des Lacks „NIR3-1113“ auf Hybrid-Bindemittelmittelbasis in Abhängigkeit von der Aushärtungsmethode	43
Tabelle 6: Glasübergangstemperatur (gemessen mittels DSC) des Epoxy-Pulverlacks „NIR1-9270“ in Abhängigkeit von der Aushärtungsmethode.....	44
Tabelle 7: Glasübergangstemperatur (gemessen mittels DMA) des NIR-Pulverlacks NIR3-1113 in Abhängigkeit von der Aushärtungsmethode.....	44
Tabelle 8: Glasübergangstemperatur (gemessen mittels DMA) des NIR-Pulverlacks NIR1-9270 in Abhängigkeit von der Aushärtungsmethode.....	45
Tabelle 9: Emitter-Typen <sup>[27]</sup> .....	56
Tabelle 10: Ermittlung der Mindestbetrahlzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern (ausgehärtet).....	57
Tabelle 11: Ermittlung der Mindestbetrahlzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern (gerade noch nicht ausgehärtet) .....	58
Tabelle 12: Einbrennparameter des NIR-Pulverlacks RAY-TEC® NIR® NIR3-1113 mittels NIR-Strahlung .....	60
Tabelle 13: Einbrennparameter des NIR-Pulverlacks RAY-TEC® NIR® NIR1-9270 mittels NIR-Strahlung .....	60
Tabelle 14: Einbrennparameter des NIR-Pulverlacks RAY-TEC® NIR® NIR3-1113.....	61
Tabelle 15: Einbrennparameter des NIR-Pulverlacks RAY-TEC® NIR® NIR1-9270 mittels NIR-Strahlung .....	61
Tabelle 16: DSC- Programm 1 .....	63
Tabelle 17: DSC- Programm 2.....	64
Tabelle 18: Wichtige Erkenntnisse zum Inhalt der Neuproduktentwicklungs-Prozesses.....	71
Tabelle 19: Wichtige Erkenntnisse zur Organisation des Neuproduktentwicklungs-Prozesses .....	74
Tabelle 20: Prozessbegleitende Erfolgsmessung nach Hausschildt [81] .....	78
Tabelle 21: Wichtige Erkenntnisse zur Innovationskultur, -grad und -messung .....	78
Tabelle 22: Wichtige Erkenntnisse zum Einfluss der Unternehmensleitung bei Neuproduktentwicklungs-Prozesses .....	80
Tabelle 23: Rücklauf der Fragebögen .....	89
Tabelle 24: Bewertung der Marktdynamik des deutschen Lack-Marktes.....	90
Tabelle 25: Bewertung der Marktdynamik des französischen Lack-Marktes.....	90
Tabelle 26: Bewertung der Marktdynamik des US-amerikanischen Lack-Marktes .....	91
Tabelle 27: Bewertung der Wettbewerbsintensität des deutschen Lack-Marktes.....	92
Tabelle 28: Bewertung der Wettbewerbsintensität des französischen Lack-Marktes.....	92
Tabelle 29: Bewertung der Wettbewerbsintensität des US-amerikanischen Lack-Marktes ....	93
Tabelle 30: Bewertung der Technologiedynamik des deutschen Lack-Marktes .....	94
Tabelle 31: Bewertung der Technologiedynamik des französischen Lack-Marktes .....	94
Tabelle 32: Bewertung der Technologiedynamik des US-amerikanischen Lack-Marktes.....	95
Tabelle 33: Bewertung der Markt-Orientierung durch die Interviewpartner .....	96
Tabelle 34: Bewertung der Kundeneinbeziehung .....	98

Tabelle 35: Bewertung der Zufriedenheit mit der Kooperationsform und den Kooperationspartnern.....	99
Tabelle 36: Bewertung der Zufriedenheit mit der Kooperationsform (Strahler-Hersteller) ....	99
Tabelle 37: Bewertung einer Kooperation mit mehreren Kooperationspartnern.....	100
Tabelle 38: Bewertung einer festen vertraglichen Kooperation.....	101
Tabelle 39: Bewertung des formalen Prozesses.....	102
Tabelle 40: Bewertung der Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase.....	103
Tabelle 41: Beurteilung der kommerziellen Bewertung im Projektverlauf.....	104
Tabelle 42: Bewertung der Multifunktionalität der Prozess-Teams .....	104
Tabelle 43: Bewertung des Einsatzes und des Engagements des Projektleiters und der Teammitglieder .....	105
Tabelle 44: Bewertung der Kommunikation.....	106
Tabelle 45: Bewertung der Unternehmensleitung.....	106
Tabelle 46: Bewertung der Ressourcenausstattung.....	107
Tabelle 47: Bewertung des Innovationsgrades (Deutschland).....	109
Tabelle 48: Bewertung des Innovationsgrades (Frankreich).....	110
Tabelle 49: Bewertung des Innovationsgrades (USA).....	110
Tabelle 50: Einzel-Ergebnisse der Gelzeitmessungen von NIR-Pulvern mit unterschiedlichen Phosphonium-Beschleunigern bei 185°C .....	120
Tabelle 51: Einzel-Ergebnisse der Gelzeitmessungen von NIR-Pulvern mit unterschiedlichen Phosphonium-Beschleunigern bei 215°C .....	120
Tabelle 52: Bestimmung der Reaktionsenthalpien der Pulver mit verschiedenen Beschleunigern.....	121
Tabelle 53: Einbrennparameter bei der Ermittlung von Mindestbetrahlzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern (ausgehärtet) .....	128
Tabelle 54: Einbrennparameter bei der Ermittlung von Mindestbetrahlzeiten von Pulverlacken mit verschiedenen Phosphonium-Beschleunigern (gerade noch nicht ausgehärtet) .....	128
Tabelle 55: Ergebnisse der Bestimmung der Glasübergangstemperatur mittels DMA .....	147
Tabelle 56: Fragen zum Themenkomplex „Formaler Prozess“ (in Anlehnung an Ernst [56] ) .....	150
Tabelle 57: Fragen zum Themenkomplex „Planungsqualität vor Eintritt in die Entwicklungsphase“ (in Anlehnung an Ernst [56] ) .....	151
Tabelle 58: Fragen zum Themenkomplex „Kommerzielle Bewertung des Projektes in seinem Verlauf“ (in Anlehnung an Ernst [56] ) .....	151
Tabelle 59: Fragen zum Themenkomplex „Orientierung des Prozesses an den Anforderungen des Marktes“ (in Anlehnung an Ernst [56] ) .....	152
Tabelle 60: Fragen zum Themenkomplex „Kundeneinbindung“ (in Anlehnung an Ernst [56] ) .....	152
Tabelle 61: Fragen zum Themenkomplex „Multifunktional zusammengesetztes Prozess-Team“ (in Anlehnung an Ernst [56] ) .....	153
Tabelle 62: Fragen zum Themenkomplex „Einsatz und Engagement des Projektleiters und der Teammitglieder“ (in Anlehnung an Ernst [56] ) .....	153
Tabelle 63: Fragen zum Themenkomplex „Kommunikation“ (in Anlehnung an Ernst [56] und Ebadi/Utterback [97] ) .....	154
Tabelle 64: Fragen zum Themenkomplex „Unternehmensleitung“ (in Anlehnung an Ernst [56] ) .....	154

Tabelle 65: Fragen zum Themenkomplex „Ressourcenausstattung“(in Anlehnung an Ernst [56] ).....	154
Tabelle 66: Fragen zum Themenkomplex „Marktdynamik“ (in Anlehnung an Ernst [56] und Jaworski/Kohli [98] ) .....	155
Tabelle 67: Fragen zum Themenkomplex „Wettbewerbsintensität“ (in Anlehnung an Ernst [56] und Jaworski/Kohli [98] ).....	155
Tabelle 68: Fragen zum Themenkomplex „Technologiedynamik“ (in Anlehnung an Ernst [56] und Jaworski/Kohli [98] ) .....	155
Tabelle 69: Fragen zum Themenkomplex „Innovationsgrad“ .....	156
Tabelle 70: Fragen zum Themenkomplex "Kooperation“ .....	156

## 12 Literaturverzeichnis

- [1] A. NOOMEN, Applications of Michael addition chemistry in coatings technology, Progress in Organic Coatings 32, **1997**, S. 137-142.
- [2] T. BROCK; M. GROTEKLAES; P. MISCHKE, Lehrbuch der Lacktechnologie, Vincentz Verlag, **1998**.
- [3] K. BÄR, Drying and Curing within Seconds-NIR-Technology-The Coldheat Revolution, PITTURES E VERNICI-EUROPEAN COATINGS 14/2001, **2001**, S.51-55.
- [4] O. V., NIR-Trocknung im Sekundentakt von Flüssig- und Pulverlacken, Galvanotechnik 90 (1999) Nr. 11, S. 3098- 3100.
- [5] Pulverlacke-Teil 14: Terminologie (ISO 8130-14:2004); Dreisprachige Fassung, EN ISO 8130-14:2004; September 2004.
- [6] J.M.G. COWIE, Chemie und Physik der synthetischen Polymeren, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, **1997**.
- [7] D. STOYE; W. FREITAG, Lackharze. Chemie, Eigenschaften und Anwendungen., Hanser-Verlag, **1996**.
- [8] W. MARQUARDT; H. GEMPELER, Triglycidylisocyanurat in Pulverlacken, Farbe & Lack, **84. Jahrgang**, S.301-306.
- [9] V. MIRGEL; K. NACHTKAMP, Chemische Aspekte vernetzender Einbrennurethanharze, Farbe&Lack, 12/1983, **89. Jahrgang**, S.928-934.
- [10] H.-U. WESTHUES; M. BOCK; W. SCHULTZ, Neue PUR-Härter für Pulverlacke, Farbe&Lack, 1/1993, **99. Jahrgang**, S. 9-15.
- [11] W. J. BLANK; Z.A. HE; E. T. HESSELL, Catalysis of the isocyanate-hydroxyl reaction by non-tin catalysts, Progress in Organic Coatings 35, **1999**, S. 19-29.
- [12] W. J. BLANK; Z. A. HE; M. E. PICCI, Catalysis of The Epoxy-Carboxyl Reaction, JCT Vol. 74/926, **2002**.
- [13] W. J. BLANK, Advances in Catalysis for Organic Coatings, Chimia, 56, **2002**, S. 191-196.
- [14] R. P. SUBRAYAN; D. J. MILLER; M. M. EMMET; W. J. BLANK, Catalysis of Thermally Curable High Solids Cycloaliphatic Epoxy Formulations, Polymeric Materials: Science & Engineering 2001, 85 unter <http://www.wernerblank.com/pdffiles/paper28.pdf>, Abrufdatum: 16.11.2004.
- [15] W. J. BLANK; Z. A. HE; M. E. PICCI, US Patent US6335304, King Industries Inc., **2002**.

- [16] J. D. B. SMITH, Quaternary phosphonium compounds as latent accelerators for anhydride-cured epoxy resins.I. Latency and cure characteristics, Journal of Applied Polymer Science, Volume 23, Issue 5, **1979**, S. 1385-1396.
- [17] T. LAUE; A. PLAGENS, Namen- und Schlagwortreaktionen der Organischen Chemie, Teubner Studienbücher, 2.,durchges. Aufl., **1995**, S. 319-323.
- [18] REKOWSKI; O. REIS; M. WULF, E. I. du Pont de Nemours and Company, US 6,432,490..
- [19] R. BLUM; W. PAULUS; R. SCHWALM, BASF AG· DE 100 04 488 A 1·
- [20] R. BLUM; R. SCHWALM; O. STEPHAN, BASF AG, DE 100 04 495 A 1.
- [21] M. SEDLMEYR, IndustrieSerVis, DE 198 31 781 A 1·
- [22] K. BLATTER; O. THIELE, Herberts GmbH, DE 198 52 268 C 1.
- [23] K. BLATTER; W. LENHARD, Herberts GmbH&Co. KG, DE 199 13 442 A 1.
- [24] K. BLATTER; W. LENHARD, Herberts GmbH&Co. KG, DE 199 13 446 A 1·
- [25] O. THIELE; A. RETTIG, Herberts GmbH &Co. KG, DE 199 27 041 A 1·
- [26] K. K. O. BÄR ; R. GAUS; M. SCHWEITZER, Advanced Photonics Technologies AG· DE Patent DE 100 64 277 A 1· **2002**·
- [27] J. REITER, Grundlagenuntersuchungen für die Aushärtung von Pulverlacken mit Hilfe von NIR- Strahlung, Dissertation, Universität Paderborn, **2003**.
- [28] H. SCHMIDT; R. NONNINGER; M. SCHICHEL; M. JOST; M. DÖBLER; W. HOHEISEL, Bayer AG· DE 100 22 037 A 1·
- [29] M.H. LA TOISON, Infrarotstrahlung und ihre thermische Anwendung, Philips´ Gloeilampenfabrieken, **1964**.
- [30] H. KUNOWSKI, Lacktrocknung durch Infrarotstrahlen, Moser Verlag, **1956**.
- [31] C.-O. ZOEPKE, Infrarot-Strahlung, Infrarot-Anwendung, Knapp-Verlag, **1965**.
- [32] A. DIBON, NIR- Technologie auf dem Vormarsch, JOT 7/2004, S. 12- 14.
- [33] R. TALBERT, Curing in seconds with NIR, Industrial Paint & Powder 04/01, **2001**, S. 30-33.
- [34] M.-L. BOPP, Maßgeschneiderte Infrarot-Strahler für die Automobil-Lackierung, JOT 3/2004, **2004**, S. 38 ff..
- [35] H. KUCHLING, Taschenbuch der Physik, Fachbuchverlag Leipzig, **1991**.
- [36] F. STEPPUTAT; G. EMMEL, Infrarot-Trocknung in der Automobilproduktion, JOT Heft 9, **1993**, S. 32-36.

- [37] F. MOHR, Erwärmen und Trocknen mit KIR, Coating 11/2001, **2001**, S. 398-401.
- [38] R. GAUS; K. K. O. BÄR; R. HAMM; R. WIRTH, Advanced Photonics Technologies AG, DE Patent DE 101 25 888 C 2, **2003**.
- [39] K. K. O. BÄR; R. GAUS; G. GESELL; T. BERGE, Advanced Photonics Technologies AG, DE Patent DE 100 51 169 A 1, **2002**.
- [40] HOMEPAGE DER FIRMA HERAEUS NOBLELIGHT, [http://www.heraeus-noblelight.com/HNG/eng/irw/irw\\_Home.nsf/\\$frameset/start](http://www.heraeus-noblelight.com/HNG/eng/irw/irw_Home.nsf/$frameset/start). Abrufdatum: 3.7.2004
- [41] I. BARTLEY, Coating curing-the role of infrared, Pigment & Resin Technology Volume 28 Number 4, **1999**, S. 233-236.
- [42] K. BÄR, Sekundenschnelle Aushärtung von Pulverlacken, JOT 1998/2, S. 26- 29.
- [43] K.-F. ARNDT; G. MÜLLER, Polymercharakterisierung, Hanser-Verlag, **1996**.
- [44] W. FUNKE, Über die Strukturaufklärung vernetzter Makromoleküle, insbesondere vernetzter Polyesterharze, mit chemischen Methoden, Adv. Polymer Sci., Vol. 4, **1965**, S. 157-235.
- [45] D. BRAUN; H. CHERDRON; H. RITTER, Praktikum der Makromolekularen Stoffe, Wiley-VCH, Weinheim, **1999**.
- [46] G. SCHWEDT, Analytische Chemie-Grundlagen, Methoden und Praxis, Georg Thieme Verlag, **1995**.
- [47] O.V., Thermische Analyse, <http://www.uni-stuttgart.de/imtk/lehrstuhl2/Scripte/Pr-ta.pdf>, Abrufdatum: 4.5.2005.
- [48] G. W. EHRENSTEIN; E. BITTMANN, Duroplaste: Aushärtung, Prüfung, Eigenschaften, Hanser-Verlag, **1997**.
- [49] G. SCHWEDT, Taschenatlas der Analytik, Thieme Verlag, 2., überarbeitete und erweiterte Auflage, **1996**.
- [50] M. HESSE; H. MEIER; B. ZEEH, Spektroskopische Methoden in der organischen Chemie, Thieme-Verlag, 5. überarbeitete Auflage, **1995**.
- [51] H. GÜNZLER; H. M. HEISE; IR-Spektroskopie: Eine Einführung, VCH Verlagsgesellschaft, 3. neubearbeitete Auflage, **1996**.
- [52] H. GÜNZLER; H. BÖCK, IR-Spektroskopie, Verlag Chemie GmbH, 2. überarbeitete Auflage, 2. Nachdruck, **1990**.
- [53] W. GOTTWALD; G. WACHTER, IR- Spektroskopie für Anwender, Wiley-VCH, Weinheim, **1997**.
- [54] Handbuch zum Messmodul DSC821, Fa. Mettler Toledo .

- [55] R.G. COOPER, *Winning at New Products: Accelerating the Process from Idea to Launch*, Perseus Book Group, **2001**.
- [56] H. ERNST, *Erfolgsfaktoren neuer Produkte*, Deutscher Universitätsverlag, **2001**.
- [57] B. J. ZIRGER; M. A. MAIDIQUE, A Model Of New Product Development: An Empirical Test, *Management Science*, Vol. 36, No. 7, July 1990, S. 867- 883.
- [58] X. M. SONG; M. E. PARRY, What Separates Japanese New Product Winners from Losers, *Journal of Product Innovation Management*, Bd. 13, **1996**, S. 422- 439.
- [59] A. GRIFFIN, PDMA Research on New Product Development Practices: Updating Trends and Benchmarking Best Practices· *Journal of Product Innovation Management*, Bd. 14· **1997**· S. 429- 458.
- [60] G. BARCZAK, New Product Strategy, Structure, Process and Performance in the Telecommunications Industry, *Journal of Product Innovation Management*, Bd. 12, **1995**, S. 224-234.
- [61] S. MISHRA; D. KIM; D. H. LEE, Factors Affecting New Product Success: Cross-Country Comparisons, *Journal of Product Innovation Management*, Bd. 13, **1996**, S. 530- 550.
- [62] R. J. CALATONE; J. B. SCHMIDT; C. A. DI BENEDETTO· New Product Activities and Performance: The Moderating Role of Environmental Hostility· *Journal of Product Innovation Management*, Bd. 14· **1997**· S. 179- 189.
- [63] K. ATUAHENE- GIMA, An Exploratory Analysis of the Impact of Market Orientation on New Product Performance- A Contingency Approach, *Journal of Product Innovation Management*, Bd. 12, **1995**, S. 275-293.
- [64] K. GRUNER; C. HOMBURG, Innovationserfolg durch Kundeneinbindung, *ZfB*, 1/99, S. 119- 142.
- [65] R. DESHPANDE, F. E. WEBSTER, Organizational Culture and Marketing: Defining the Research Agenda, *Journal of Marketing*, 53, **1989**, S.3-15.
- [66] A. GRIFFIN; J. R. HAUSER, Patterns Of Communication Among Marketing, Engineering And Manufacturing-A Comparison Between Two New Product Teams, *Management Science*, Vol. 38, No. 3, March **1992**, S. 360-373.
- [67] X. M. SONG; M. M. MONTOYA-WEISS; J. B. SCHMIDT, Antecedents and Consequences of Cross- Functional Cooperation: A Comparison of R&D, Manufacturing, and Marketing Perspectives, *Journal of Product Innovation Management*, Bd. 14, **1997**, S. 35- 47.

- [68] D. AYERS; R. DAHLSTROM; S. J. SKINNER, An Exploratory Investigation of Organizational Antecedents to New Product Success, *Journal of Marketing Research* Vol. XXXIV (February 1997), S. 107-116.
- [69] D. GERWIN; L. MOFFAT, Withdrawal of Team Autonomy During Concurrent Engineering, *Management Science*, Vol. 43, No. 9, September 1997, S. 1275- 1287.
- [70] R. BALACHANDRA; K. K. BROCKHOFF; A. W. PEARSON, R&D Project Termination Decisions: Processes, Communication, and Personnel Changes, *Journal of Product Innovation Management*, Bd. 13, **1996**, S. 245- 256.
- [71] R. W. RUEKERT; O. C. WALKER, Marketing's Interaction with Other Functional Units: A Conceptual Framework and Empirical Evidence, *Journal of Marketing*, 51, **1987**, S. 1-19.
- [72] K. BROCKHOFF, *Management von Innovationen: Planung und Durchsetzung: Erfolge und Misserfolge: Fallstudien mit Lösungen*, Gabler Verlag, **1996**.
- [73] A. H. VAN DE VEN; G. WALKER, The Dynamics of Interorganizational Coordination, *Administrative Science Quarterly*, Bd. 29, **1984**, S. 598-621.
- [74] J. M. HIGGINS; G.G. WIESE, *Innovationsmanagement*, Springer Verlag; Berlin; Heidelberg; New York, **1996**.
- [75] H. ERNST, Unternehmenskultur und Innovationserfolg- Eine empirische Analyse, *zfbf* 55 Februar, **2003**, S. 23- 44.
- [76] L. SMIRCICH, Concepts of Culture and Organizational Analysis, *Administrative Science Quarterly*, Bd. 28, **1983**, S. 339-358.
- [77] E. H. SCHEIN, *Unternehmenskultur*, Campus Verlag, **1995**.
- [78] K. S. CAMERON; S. J. FREEMAN, Cultural Congruence, Strength, And Type: Relationships To Effectiveness, *Research in Organizational Change and Development*, Volume 5, **1991**, S. 23-58.
- [79] J. HAUSCHILDT, *Innovationsmanagement*, Verlag Vahlen, **1997**.
- [80] K. BROCKHOFF, Die Produktinnovationsrate im Lagebericht, *Der Betrieb*, Heft 9, 34. Jahrgang, vom 27. Februar 1981, S. 433- 436.
- [81] J. HAUSCHILDT, Zur Messung des Innovationserfolgs, *ZfB* 61, Jg. (1991), H. 4, S. 451-476.
- [82] H. SCHMALEN; C. WIEDEMANN, Erfolgsdeterminanten von Neuprodukten deutscher Hochtechnologie-Unternehmen, *ZfB*, 1/99, *ZfB- Ergänzungsheft*, S. 69- 89.

- [83] R.G. COOPER; E.J. KLEINSCHMIDT, Winning Businesses In Product Development: The Critical Success Factors' Research Technology Management, Vol. 39, Issue 4' **Jul/Aug 96** S. 18-29.
- [84] T. J. GERPOTT, Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement, Schäffer-Poeschel Verlag Stuttgart, **1999**.
- [85] A. ZWECK, Zur Gestaltung technischen Wandels, wissenschaftsmanagement 2 märz/april, **2003**, S. 25- 32.
- [86] B. HIRSCH; O. TIDELSKI, Vitales Beziehungsgeflecht auf Vertrauensbasis- Entstehung und Förderung regionaler Innovationsnetzwerke, wissenschaftsmanagement 4 juli/august, **2002**, S. 9- 13.
- [87] D. SPECHT; C. MIEKE, Vertrauensvoller Austausch von Informationen- Organisatorische Gestaltung und Nutzung von Netzwerken für die Technologiefrühaufklärung, wissenschaftsmanagement 6 november/dezember, **2003**, S. 35- 38.
- [88] J. KEIZER; J.-P. VOS, Diagnosing risk in new product development, wissenschaftsmanagement 2 märz/april, **2003**, S. 14- 19.
- [89] V. A. ZEITHAML; P.R. VARADARAJAN; C.P. ZEITHAML, The Coningency Approach: Its Foundations and Relevance to Theory Building and Research in Marketing, European Journal of Marketing, Bd. 22, Nr. 7, **1988**, S.37-64.
- [90] D.T. CAMPBELL; D.W. FISKE, Convergent And Discriminant Validation By The Multitrait-Muktimethod Matrix, Psychological Bulletin, Vol. 56, No. 2, **March 1959**, S.81-105.
- [91] T.R. MITCHELL, An Evaluation of the Validity of Correlation Research Conducted in Organizations· Academy of Management Review· Vol. 10, No.2· **1985**· S.192-205.
- [92] R.P. BAGOZZI; G.R. FOXALL, Construct validation of a measure of adaptive-innovative cognitive styles in consumption, International Journal of Research in Marketing, 13, **1996**, S.201-213.
- [93] J.C. ANDERSON, An Approach For Confirmatory Measurement And Structural Equation Modeling of Organizational Properties· Science Management· 33· **1987**· S.525-541.
- [94] A. GRIFFIN; A. L. PAGE, PDMA Success Measurement Project: Recommended Measures for Product Development Success and Failure, Journal of Product Innovation Management, 13, **1996**, S. 478-496.
- [95] H. DILLER; J. LÜCKING, Die Resonanz der Erfolgsfaktorenforschung beim Management von Großunternehmen, ZfB, 63. Jhg., H.12, **1993**, S. 1229-1249.

- [96] R SCHNELL; P.B. HILL; E. ESSER, , Methoden der empirischen Sozialforschung, Oldenbourg Verlag, 6. Völlig überarb. und erw. Aufl., **1999**.
- [97] Y. M. EBADI; J. M. UTTERBACK, The Effects Of Communication On Technological Innovation, Management Science, Vol. 30, No. 5, May 1984, S. 572- 585.
- [98] B. J. JAWORSKI; A. K. KOHLI, Market Orientation: Antecedents and Consequences, Journal of Marketing Vol. 57 (July 1993), S. 53- 70.