

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

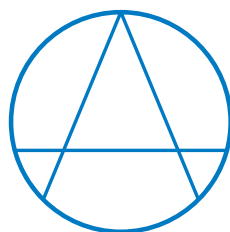
FAKULTÄT FÜR ARCHITEKTUR

Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und
Konservierungswissenschaft

Bachelor's Thesis

**Untersuchung zur Materialität und Konservierung
zweier Apple iBooks**

Janine Köppen
2015



Technische Universität München

Fakultät für Architektur

Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und
Konservierungswissenschaft

Bachelor's Thesis

**Untersuchung zur Materialität und Konservierung zweier
Apple iBooks**

Autor: Janine Köppen

Datum: 10. August 2015

**Betreuer im
Deutschen Museum:** Dr. Marisa Pamplona Bartsch

Prüfer: Prof. Dipl.-Rest. Erwin Emmerling
Dr. des. Dipl.-Rest. Catharina Blänsdorf

Kurzfassung

Kunststoffe treten in Sammlungen nicht nur in Form von Haushaltswaren, Möbeln oder Spielzeugen auf, sondern auch als Bestandteil von Textilien oder elektronischen Geräten. Die Erhaltung von Geräten des alltäglichen Gebrauchs wie Personal Computern fallen so schon heute in das Aufgabenfeld von Restauratoren. In der vorliegenden Arbeit wurde die Materialität zweier Apple iBooks G3 untersucht. Durch Literaturrecherchen wurden Details zum Entwurfs- und Herstellungsprozess der iBooks zusammengetragen sowie Einblicke in die Apple-Produktentwicklung gegeben. Ziel der Untersuchungen war es, Ursachen für die auftretenden Risse innerhalb des Polycarbonat-Gehäuses, der Farbveränderungen an der Polyurethan-Gummierung sowie Materialveränderungen (Verformung und migrierten Weichmachern) an den Kabeln aus Weich-PVC zu finden. Zur Bestimmung der Kunststoffe wurden Proben mittels FT-IR analysiert, um anschließend Recherchen zu den Eigenschaften der nachgewiesenen Kunststoffe durchzuführen. Aus den Ergebnissen wurden Rückschlüsse auf die Schadensursachen gezogen. Abschließend wurden aus den gewonnenen Erkenntnissen zu den Materialeigenschaften und Schadensursachen Empfehlungen zur Konservierung und Lagerung der iBooks mitsamt derer Netzteile abgeleitet.

Abstract

Plastics appear in collections not only as household goods, furniture or toys, but also as part of textiles or electronic devices. The preservation of devices that are part of our everyday life like personal computers are already relevant for conservators. In this thesis two Apple iBooks G3 have been examined. Information about the Apple design and production process has been collected from literature. The research aimed on investigating the cause of stress-cracking in the polycarbonate cases, the yellowing of the polyurethane rubber and changes within the plastizised PVC cables. The plastics were analysed through FT-IR spectroscopy, in order to gather information about the verified materials. The results allowed to draw conclusions about the material properties and degradation mechanisms. Guidelines for preventive conservation and storage of the iBooks based on the research findings have been given.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einleitung & Ziele	1
2	Die Apple iBook-Serie	3
2.1	iBook G3 ('Clamshell')	5
2.1.1	iBook SE & SE (FireWire)	7
2.2	iBook G3 'Ice' Dual USB	7
3	Untersuchung und Vergleich der iBooks G3 in Tangerine und Graphite	9
3.1	Dokumentation	9
3.1.1	Identifikation	10
3.1.1.1	iBook G3 in Tangerine	10
3.1.1.2	iBook G3 in Graphite	10
3.1.2	Visuelle Untersuchung	11
3.1.3	Zustandserfassung und Vergleich beider iBooks	11
3.1.3.1	Oberflächenschmutz	11
3.1.3.2	Klebrige Oberflächen	12
3.1.3.3	Abnutzungsspuren	12
3.1.3.4	Risse und Sprünge	12
3.1.3.5	Verfärbungen	12
3.1.3.6	Fehlstellen	13
3.1.3.7	Verformungen	13
3.2	Materialanalysen	14
3.2.1	IR-Spektroskopie	15
3.2.1.1	ATR FT-IR	17
3.2.2	Resultat & Auswertung	18

3.2.3	Zusammenfassung der Analysenergebnisse	24
3.3	Untersuchungen zu den Kunststoffen	25
3.3.1	Polycarbonat	25
3.3.1.1	Chemikalienbeständigkeit	26
3.3.1.2	Alterungsverhalten	27
3.3.1.3	Spannungsrissverhalten	27
3.3.2	Polyurethan-Elastomere	30
3.3.2.1	Chemikalienbeständigkeit	31
3.3.2.2	Alterungsverhalten	31
3.3.3	Polyvinylchlorid	33
3.3.3.1	Chemikalienbeständigkeit	34
3.3.3.2	Alterungsverhalten von Weich-PVC	34
3.4	Empfehlungen zur Konservierung und Lagerung	37
3.4.1	Notebook	37
3.4.2	Netzteil	38
4	Zusammenfassung und Ausblick	41
4.1	Zusammenfassung	41
4.2	Ausblick	43
	Literatur	45
A	Fotodokumentation	51
A.1	iBook ‘Tangerine’	51
A.2	iBook ‘Graphite’	61
B	Analyseberichte	71

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einleitung & Ziele

Kunststoffe sind aus Museumsbeständen heute kaum mehr wegzudenken. Ob Designmuseen, technische Museen oder moderne Sammlungen, sie alle besitzen in großer Anzahl Objekte aus modernen Werkstoffen. Trotz der stetigen Weiterentwicklung auf dem Forschungsgebiet, welches sich mit der Erhaltung von Kulturgut aus synthetischen Materialien beschäftigt, stellt diese Teildisziplin der Konservierung und Restaurierung ein noch relativ junges Forschungsfeld dar¹. Kunststoffe treten in Sammlungen nicht nur in Form von Haushaltswaren, Möbeln oder Spielzeugen auf, sondern auch als Bestandteil von Textilien oder elektronischen Geräten. Die Erhaltung von Geräten des täglichen Gebrauchs wie Personal Computern fallen so schon heute in das Aufgabenfeld von Restauratoren. Die Ausstellung, Lagerung und Restaurierung darin enthaltener Kunststoffe stellt Kuratoren wie Restauratoren, aufgrund der schnellen Alterung von synthetischen Polymeren im Vergleich zu traditionellen Materialien, gleichermaßen vor Herausforderungen.

Die vorliegende Bachelorarbeit entstand im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens des Deutschen Museum in München (DM), Der Neuen Sammlung - The Design Museum Munich (DNS) und der Technischen Universität München, dessen Ziel ein umfassendes Monitoring der Personal Computer (PC) aus den Beständen Der Neuen Sammlung und des Deutschen Museums ist. Während des Vorhabens werden die für PCs verwendeten Materialien identifiziert und hinsichtlich ihrer Hauptschadensformen untersucht. Darüber hinaus werden die Schadensursachen erforscht, um ausgehend von den Ergebnissen Strategien zur Präventiven Konservierung zu entwickeln. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich der Produktentwicklung von Personal Computern. Dabei sollen die Gründe von Designern oder Ingenieuren über die Wahl bestimmter Kunststoffe ermittelt werden. Das gewonnene Wissen soll Museen und Institutionen mit ähnlichen Sammlungsschwerpunkten zur Verfügung gestellt werden, um einen einheitlichen Forschungsstand im

¹Die Anfänge der Restaurierung moderner Materialien lassen sich nach Waentig (2004) in den 1960er Jahren des vergangenen Jahrhunderts ausmachen.

Bereich der Personal Computer zu schaffen.

In der vorliegenden Arbeit wurde exemplarisch die Materialität zweier Apple iBooks G3 untersucht. Aus zeitlichen Gründen erfolgte eine Eingrenzung auf die Kunststoffe, welche für die Außenhülle der Geräte verwendet wurden. Die Untersuchung des technischen Innenlebens mitsamt der dort eingesetzten Polymere, Metalle etc. war nicht Teil dieser Arbeit. Durch Literaturrecherchen wurden Details zum Entwurfs- und Herstellungsprozess der iBooks zusammengetragen und Einblicke in die Apple-Produktentwicklung gegeben.

Ein augenscheinlicher Vergleich beider Laptops vor Beginn der Arbeit zeigte Unterschiede in den Erhaltungszuständen auf. So besitzt das iBook 'Tangerine' (DNS), im Gegensatz zum iBook 'Graphite' (DM) eine ausgeprägte Rissbildung entlang des Apple-Logos auf der Innenseite. Bei den Untersuchungen wurde geklärt, was die Rissbildung verursachte und weshalb iBook 'Graphite' von einer Rissbildung dieses Ausmaßes verschont blieb. Weiterführend wurde untersucht, weshalb die Risse entlang der Logos auf der Innenseite entstanden, jedoch bei den Apple-Logos an den Außenseiten der Deckel ausblieben. Auch wurden Gründe für die Vergilbung der farbigen Gummierung an dem iBook 'Graphite' sowie der Materialveränderungen an den Netzteilkabeln beider Notebooks gefunden.

Mittels FT-IR Analysen von Kunststoffproben wurden die Materialien bestimmt und Recherchen zu den Eigenschaften der nachgewiesenen Kunststoffe durchgeführt. Aus den Ergebnissen wurden Rückschlüsse auf die Schadensursachen gezogen. Dabei war zu klären, ob die Schäden während des Gebrauchs der iBooks entstanden oder Folgen falscher Lagerungs- und Ausstellungsbedingungen waren. Dazu wurde der Herstellungsprozess sowie dessen Einfluss auf die Materialeigenschaften der Kunststoffe mit berücksichtigt.

Abschließend wurden aus den gewonnenen Erkenntnissen zu den Materialeigenschaften und Schadensursachen Empfehlungen zur Konservierung und Lagerung der iBooks mitsamt derer Netzteile abgeleitet.

Kapitel 2

Die Apple iBook-Serie

Als Steve Jobs im Juli 1997, zwölf Jahre nach seiner Entlassung bei der Firma, die er 1976 mitgegründet hatte, in den Vorstand zurückkehrte, befand sich Apple in einer Krise. Das Unternehmen musste schwere Verluste verzeichnen und seine Marktanteile sanken. Wie bei Kahney (2014) beschrieben war das Unternehmen in ein kreatives Chaos verfallen, bei dem die einzelnen Abteilungen nicht an einem Strang zogen, sondern jede eine eigene Vorstellung von den fertigen Produkten hatte. Diese Desorientierung ließ sich auch im damaligen Produktsortiment ablesen: zu jenem Zeitpunkt hatte Apple 40 Produkte auf dem Markt, die unverständliche Namen mit konfusen Kombinationen aus Zahlen und Buchstaben besaßen, die wiederum in selbst für Mitarbeiter undurchschaubaren Produktlinien unterteilt waren. Um mit Apple wieder an alte Erfolge anknüpfen zu können, sah Jobs die einzige Chance in einer radikalen Umstrukturierung und Rückkehr zu den Wurzeln. Seine Philosophie lautete: Ordnung durch Einfachheit.

Jobs strich fast alle Produkte aus dem Hardwaresegment und konzentrierte sich wieder auf den Kern des Unternehmens: den Computer. Die neue Produktstrategie kann durch das in Abbildung 2.1 gezeigte und von Jobs entwickelte 2 x 2 Raster veranschaulicht werden. Es beinhaltet die Aufteilung in Verbraucher- und Profiline sowie einer weiteren Gliederung in Desktop- und tragbare Rechner. Die Abgrenzung der Produktlinien schlug sich auch in der Namensgebung nieder. So erhielten die Profi-Geräte, zu denen u. a. der G3 PowerMac und das portable PowerBook zählten, das Präfix 'Power'. Nach Erdmann (2011) waren sie für den professionellen Anwender konzipiert, der vor allem auf ein großes Display und eine hohe Rechenleistung achtete. Den normalen Nutzer, der sich die teureren High-End-Geräte oft nicht leisten konnte, wollte Apple mit der Consumer-Linie ansprechen.

Dazu setzte Apple auf eine neue Herangehensweise bei der Produktentwicklung. Die Computerindustrie zu der Zeit war auf technische Merkmale fixiert: Größe der Festplatte, Schnelligkeit u.a. Der Nutzer des Computers blieb dabei außen vor. Jobs dagegen wollte wieder den Kunden mit seinen Bedürfnissen in den Vordergrund stellen. Der Schlüssel dazu war für ihn die Rückkehr zum Industriedesign, gepaart mit Vereinfachung.

Bei dem „großen Bruder“ des iBooks, dem iMac wandte Jobs erstmals seine neue Philosophie an. Er sah großes Potenzial in der Erschließung des Heimcomputermarktes und wollte explizit einen Desktopcomputer für Privatpersonen entwickeln, mit dem ein einfacher Einstieg in das aufkommende Internet möglich war. Das „i“ im Namen steht dementsprechend für „Internet“ und wurde für alle Produkte der Verbraucherlinie beibehalten (Kahney, 2014).

Der ab August 1998 erhältliche iMac war laut Kahney (2014, S. 153) der erste „*alllastenfreie*“ Computer, bei dem Apple auf überkommene Technologien verzichtete und stattdessen auf zum Teil noch in den Anfängen steckende neue Technologien setzte. Die Reduzierung durch das Weglassen von unnötigen Teilen entsprach Jobs Philosophie der Vereinfachung. So wagte es Apple, auf ein Diskettenlaufwerk zu verzichten und verbaute stattdessen einen USB-Anschluss, über den Peripheriegeräte mit dem iMac verbunden werden konnten. Diese Schnittstelle, die heute zur Standardausstattung eines Computers zählt, war gerade erst von Intel erfunden worden. Dementsprechend kritisch wurde dieses Vorgehen in der Presse kommentiert. Doch der Erfolg gab Apple recht, der iMac wurde, wie von Jobs vorausgesagt, zum Verkaufsschlager und rettete das Unternehmen vor dem Bankrott.

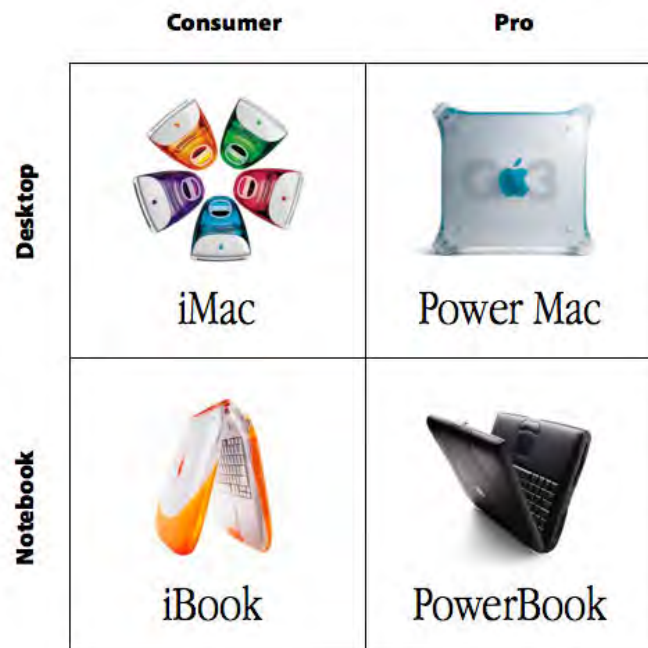


Abbildung 2.1: Apples neue Produktstrategie bestehend aus: Verbraucher- (Consumer) und Profiline (Pro) sowie Desktop- und tragbaren Rechnern (©Apple).

2.1 iBook G3 (‘Clamshell’)

Nach der Markteinführung des iMacs war das nächste Ziel von Apple die Entwicklung eines tragbaren Computers für den Verbrauchermarkt. Wie schon bei dem Desktop-Rechner wurde das hausinterne Designteam um Chefdesigner Jonathan Ive damit beauftragt. Konzipiert als Laptop-Variante des iMacs greift das iBook optisch dessen Design auf. Es finden sich Ähnlichkeiten in den Rundungen und dem durchscheinenden farbigen Plastikgehäuse beider Geräte.

Der finale Entwurf des iBooks mit seiner muschelartigen Form, die ihm den Spitznamen „Clamshell“¹ einbrachte, war neuartig. Er unterschied sich von allen bisherigen Laptopmodellen der Konkurrenz. Nicht nur seine geschwungene runde Form machten es einzigartig, sondern auch seine bunte Farbgestaltung. Die erste Auflage des iBooks G3 von 1999 war wie schon beim iMac in mehreren Farben, Blueberry und Tangerine, erhältlich. Vor der Veröffentlichung des iBooks waren Laptopgehäuse eckige Kisten, welche in Beige oder Schwarz gehalten waren. Danach avancierten sie, so Schulze und Grätz (2011), zu freundlichen und ästhetisch ansprechenden Einrichtungsgegenständen, die je nach Geschmack in verschiedenen Farben erworben werden konnten.

Doch nicht nur das Design stand im Mittelpunkt, sondern auch die Benutzerfreundlichkeit. Eine der Innovationen war das „Aufwachen“ - d. h. das Beenden des Ruhezustandes - beim Aufklappen des Computers. Um diese Funktion zu ermöglichen, entwarf Ive einen besonderen Schließmechanismus, der ohne einen mechanischen Riegel auskam. Ermöglicht wurde dies durch den Einsatz eines speziellen Scharniers, das den Deckel sicher schloss,

¹aus dem englischen = Muschel.



Abbildung 2.2: iBooks in den Farben Blueberry, Tangerine (1999) und Graphite (2000) (© Apple).

wenn der Laptop zugeklappt war (Kahney, 2014). Durch das automatische Versetzen in den Ruhezustand beim Schließen des Deckels konnte die Akkulaufzeit verlängert werden.

Ein weiteres Alleinstellungsmerkmal war der an der Rückseite befestigte, ausklappbare Tragegriff. Wie bei Kahney (2014) beschrieben, stand bei der Gestaltung nicht nur eine gute Handhabbarkeit im Vordergrund. Vor allem sollte der Griff den Nutzer dazu animieren, das Gerät anzufassen, wodurch anfängliche Ängste oder Distanzen überwunden werden sollten. Nach Schulze und Grätz (2011, S. 14) hatte der Besitzer so die Möglichkeit, eine emotionale Bindung zu der „*unbekannten Maschine*“ aufzubauen.

Technisch war das iBook durch seinen leistungsstarken Lithium-Ionen-Akku mit einer Laufzeit von sechs Stunden und der neuen WLAN Technologie ebenfalls ein Vorreiter. Apple erfand die WLAN-Technologie nicht neu, jedoch war es der erste Hersteller, der sein Potenzial erkannte. Für 99 US\$ konnte das iBook mit einer Netzwerkkarte erweitert werden, mit der über eine im Display verbauten Antenne eine drahtlose Verbindung zu einer Basisstation hergestellt werden konnte. Diese war wiederum über Kabel mit dem Internet verbunden. Apple nannte seine Kombination aus Netzwerkkarte und Basisstation „Airport“. Kahney (2014) stellte fest, dass das iBook zwar nicht der erste Laptop war, über den man kabellos ins Internet gehen konnte, allerdings der erste, der alle nötigen Komponenten fest im Gehäuse integriert hatte. So mussten keine unpraktischen Steckkarten mit heraushängenden Antennen verwendet werden. Zusätzlich besaß das iBook einen Ethernet- und Modem-Anschluss sowie einen USB-Anschluss, einen Lautsprechereingang und ein CD-ROM Laufwerk. Weiter war es mit einem 300 MHz Power PC Prozessor, 32 MB RAM und einer 3,2 GB Festplatte ausgestattet.

Das in den USA ab September 1999 für 1599 US\$ und in Deutschland für 3880 DM erhältliche iBook G3 wurde extrem erfolgreich in Universitäten, Schulen und in privaten Haushalten. Mit 160.000 Vorbestellungen vor Verkaufsstart wurden sogar die Zahlen für den iMac übertroffen, die bei 150.000 Vorbestellungen lagen. Apple konnte seinen Marktanteil auf 14 % verdoppeln und für das zweite Quartal 1999 um 1,53 Milliarden US\$ höhere Einnahmen als im Vorjahresquartal erzielen (Erdmann, 2011). Auch tauchte das iBook G3 einige Jahre nach Veröffentlichung in zahlreichen Filmen und Serien auf, wodurch es zu einem Lifestyle-Produkt avancierte (Carter, 2013).

Der iMac und das iBook veränderten den Computermarkt nachhaltig. Vergangene Zeiten, in denen trockene Angaben wie die Prozessorgeschwindigkeit wichtig waren, galten als überholt. Was von nun an zählte war „*gutes Aussehen, leichte Bedienung oder Anpassungsmöglichkeiten*“ (Kahney, 2014, S. 165). Kritische Stimmen sahen in der neuen Produktphilosophie allerdings den Versuch Apples Geräte an die breite Masse zu verkaufen. In der Folge würden die Apple-Nutzer der ersten Stunde, die kreativen Leute, vernachlässigt, da für sie keine geeigneten Rechner mehr entwickelt würden. Viel mehr verkam der Laptop laut Schulze und Grätz (2011, S. 57) zu „*quietschig-bunten und fröhlichen Spielgenossen, die keine ernsthaften Arbeitsgeräte mehr waren.*“

2.1.1 iBook SE & SE (FireWire)

Am 16. Februar 2000 brachte Apple eine technisch leicht veränderte Version des iBook G3, das iBook G3 SE (Special Edition) in der Farbe Graphite auf den Markt. Sie unterschied sich von der Vorgängerversion durch mehr Leistung, da sie einen 366 MHz Prozessor, 64 MB RAM und eine 6 GB Festplatte besaß. Der Preis wurde auf 1799 US\$ angehoben (Erdmann, 2011).

Eine technisch stärker überarbeitete Version stellte das iBook G3 SE (FireWire) dar. Es kam am 13. September 2000 auf den Markt. Die größte Neuerung war die Integration eines FireWire-Anschlusses sowie eines Composite-Video-Ausganges. Dadurch war es dem Nutzer möglich, die mit dem vorinstallierten Programm iMovie 2 bearbeiteten Filme auf einem Fernsehgerät abzuspielen. Auf technischer Ebene gab es zwei Versionen des iBook FireWire. Die etwas reduzierte Version besaß einen 366 MHz Prozessor, eine 10 GB Festplatte und 64 MB RAM. Sie war in den Farben Graphite, Indigo und Key Lime erhältlich. Die zweite Version war mit einem schnelleren 466 MHz G3-Prozessor sowie einem DVD-ROM Laufwerk ausgestattet und nur in den Farben Graphite und KeyLime zu kaufen. Allerdings war die Farbe KeyLime ausschließlich online im Apple-Store erhältlich, was diese Ausführung laut Erdmann (2011) heute zu einem seltenen und begehrten Sammlerstück macht.



Abbildung 2.3: iBook SE in den Farben KeyLime, Indigo und Graphite aus dem Jahr 2000 (©Apple).

2.2 iBook G3 ‘Ice’ Dual USB

Die namensgebenden Neuerungen gegenüber dem Vorgängermodell waren das veränderte Design und die Erweiterung auf zwei USB-Anschlüsse. Wegen mehrerer Produktfehler bei der Herstellung des PowerBooks beschloss Apple, die verwendete Polycarbonat-Hülle mit

einem inneren Magnesiumrahmen zu verbinden. Beim PowerBook war es zum Lösen einzelner Bauteile im Inneren der Rechner gekommen, wenn diese Stößen oder Erschütterungen ausgesetzt waren (Kahney, 2014).

Das iBook Dual USB grenzt sich optisch deutlich von seinem Vorgängermodell ab. Es gibt keine verspielten Formen mehr. Im Gegenteil, das iBook wirkt gradlinig und kompakt. Es hat klar definierte Linien und eine einheitliche weiße Farbe, was es sauber und strukturiert wirken lässt. Das transparente Polycarbonat-Gehäuse ist von Innen mit einer weißen Farbschicht bestrichen, wodurch es laut Kahney (2014) eine einzigartige Tiefenillusion bekommt, die später in anderen Apple-Geräten wiederaufgegriffen wurde. Gleichzeitig wirkt es dadurch kleiner, als es tatsächlich sei. Beim Öffnen des Laptops gehe die Kompaktheit allerdings in Weitläufigkeit über. Durch ein spezielles L-förmiges Scharnier befindet sich das Display weiter hinter der Tastatur als man zunächst erwarten würde. Dadurch würde der Eindruck von mehr Raum und Fläche vermittelt, der den Laptop zugänglicher erscheinen lasse.

Technisch gesehen war das iBook Dual USB das erste Gerät, das mit einem Kombi-Laufwerk ausgestattet war. Es konnte sowohl DVDs lesen, als auch CDs schreiben. Es besaß darüber hinaus einen 500 MHz G3 Prozessor, einen VGA-Ausgang und ein 12-Zoll-TFT-Display (Erdmann, 2011).

Die iBook Serie war bis 2006 im Handel erhältlich, als Apple sie mit der Einführung des MacBooks einstellte.

Kapitel 3

Untersuchung und Vergleich der iBooks G3 in Tangerine und Graphite

3.1 Dokumentation

Um den Erhaltungszustand beider Laptops festzustellen, wurden das iBook G3 ‘Tangerine’ aus der Neuen Sammlung sowie das iBook G3 ‘Graphite’ aus dem Bestand des Deutschen Museums auf Schäden untersucht (Abbildung 3.1). So konnten erste Hinweise auf typische Schäden der verwendeten Kunststoffarten gefunden werden. Unterschiede in den Erhaltungszuständen und der Materialität können darüber hinaus Aufschluss geben, welche Faktoren bei der Alterung von Bedeutung sind. Eine ausführliche Fotodokumentation beider Geräte befindet sich im Anhang A.



Abbildung 3.1: iBook ‘Tangerine’ aus dem Jahr 1999. (links) und iBook ‘Graphite’ aus dem Jahr 2000 (rechts).

3.1.1 Identifikation

3.1.1.1 iBook G3 in Tangerine

iBook G3	
Inv.-Nr.	852/2008-1 (Notebook), 727/2004-2 (Netzteil)
Sammlung	Die Neue Sammlung - The International Design Museum Munich
Objektbezeichnung	Notebook mit dazugehörigem Netzteil
Designer	Jonathan Ive Design Team
Jahr	1999
Hersteller	Apple Computer Inc., Cupertino (USA)
Herstellungsort	Taiwan
Maße	55 x 345 x 295 mm
Gewicht	3,05 kg
Materialien	verschiedene Kunststoffe; Metalle
Farbe	'Tangerine'
Erwerb	Geschenk Agentur Funktionsgruppe (Oliver Marx), München
Standort	PDM Depot

3.1.1.2 iBook G3 in Graphite

iBook G3 SE (FireWire)	
Inv.-Nr.	2012-1213T1 (Notebook), 2012-1213T2 (Netzteil)
Sammlung	Deutsches Museum, München
Objektbezeichnung	Notebook mit dazugehörigen Netzteil
Designer	Jonathan Ive Design Team
Jahr	2000
Hersteller	Apple Computer Inc., Cupertino (USA)
Herstellungsort	Taiwan
Maße	55 x 345 x 295 mm
Gewicht	3,05 kg
Materialien	verschiedene Kunststoffe; Metalle
Farbe	'Graphite'
Standort	Außendepot Garching

Bei dem Laptop aus dem Bestand des Deutschen Museums handelt es sich um ein Modell der letzten iBook 'Clamshell'-Generation, der SE (FireWire)-Serie mit einem 466 MHz G3-Prozessor und DVD-ROM Laufwerk.

3.1.2 Visuelle Untersuchung

Das Gehäuse beider iBooks besteht aus einem weißen, durchscheinenden Kunststoff. Im Fall des älteren Modells, dem iBook ‘Tangerine’, besitzt dieser eine raue Oberfläche. Beim iBook ‘Graphite’, dem letzten Modell der Clamshell-Serie, wurden die äußeren Oberflächen glatt und glänzend ausgearbeitet (Abbildung 3.2). Die Oberflächengestaltung der Innenseiten ist bei beiden Geräten übereinstimmend rau. Die Akkufächer auf den Unterseiten haben eine unterschiedliche Farbigkeit. Beim iBook ‘Tangerine’ ist der Kunststoff orange gefärbt, während er beim iBook ‘Graphite’ weiß ist (Abbildung 3.5).

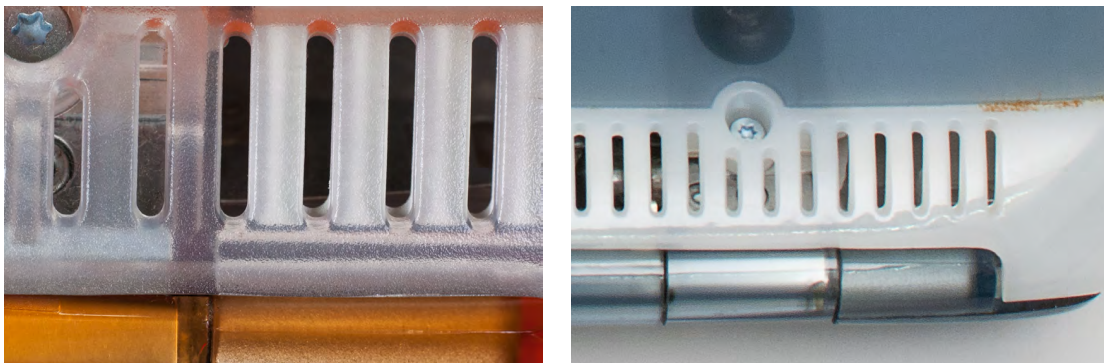


Abbildung 3.2: Die weiße Kunststoffoberfläche von iBook ‘Tangerine’ ist rau ausgearbeitet (links) im Gegensatz zur glatten Oberfläche von iBook ‘Graphite’ (rechts).

Die Unterseite und der vordere Rand des Deckels sind mit einem jeweils farblich variierenden gummiähnlichen Kunststoff überzogen. Dieser sorgt für eine weichere und griffigere Oberfläche. Der Tragegriff sowie die zwei gefärbten Apple-Logos an Deckel Außen- und Innenseite bestehen aus einem farblich identischen, durchsichtigen und glänzenden Kunststoff. Das Apple-Logo auf der Unterseite ist aus einem durchsichtigen weißen Kunststoff. Die Tastatur besteht aus durchsichtigem weißen Kunststoff.

3.1.3 Zustandserfassung und Vergleich beider iBooks

3.1.3.1 Oberflächenschmutz

Die Oberfläche des iBooks ‘Tangerine’ ist leicht verschmutzt, die des iBooks ‘Graphite’ bedeckt eine Staub- und Schmutzschicht, die sich besonders zwischen den Tasten festgesetzt hat (Abbildung A.31). In einigen Fugen, hauptsächlich auf der Rückseite, hat sich beim iBook ‘Graphite’ Schmutz angesammelt (Abbildung A.30). An der gummierten Unterseite sind bei beiden Geräten Flecken zu erkennen. Am iBook ‘Graphite’ fällt ein ca. 3 cm großer, gelber Fleck besonders auf (Abbildung A.20). Beim iBook ‘Graphite’ erstrecken sich die Flecken und gelben Verfärbungen auch auf die gesamte Geräteoberfläche. Auf dem Display beider Geräte finden sich mehrere Flecken, Streifen und Fingerabdrücke.

3.1.3.2 Klebrige Oberflächen

Die Kunststoffummantelung des Kabels an beiden Netzteilen ist klebrig, wobei die klebrigen Oberflächen beim iBook ‘Graphite’ stärker aneinanderhaften, sodass die Abwicklung des Kabels erschwert ist. Beim iBook ‘Graphite’ haften zusätzlich Staub und Schmutz an der Oberfläche.

3.1.3.3 Abnutzungsspuren

Die Kunststoffoberfläche beider iBooks weist Abnutzungsspuren wie Kratzer, abgeriebene Stellen und Dellen auf. Besonders ausgeprägt sind die Kratzer in der glatten, weißen Kunststoffoberfläche des Deckels am iBook ‘Graphite’. Auch der gummiartige, farbige Kunststoff an beiden Laptops ist mit Kratzern versehen, vermehrt an der Vorderseite des Deckels, wo dieser zum Öffnen angefasst wird, sowie an den Unterseiten beider Geräte. Die großflächigen Kratzer an der Unterseite beeinträchtigen besonders beim iBook ‘Tangerine’ den ursprünglichen Oberflächeneindruck (Abbildung A.15). Der durchsichtige Kunststoff des Netzteils ist an beiden iBooks an Ober- und Unterseite leicht zerkratzt.

3.1.3.4 Risse und Sprünge

Der für das Gehäuse verwendete Kunststoff weist an beiden Laptops Sprünge und Risse auf. Auffällig sind diese an der Grenzfläche zwischen gefärbtem Apple-Logo und umgebendem Gehäuse unterhalb des Displays. Dort haben sich im weißen Kunststoff strahlenförmig 2 bis 3 cm große Risse ausgebildet. Beim iBook ‘Graphite’ sind diese allerdings weniger stark ausgeprägt (Abbildung 3.3). Der Power-Knopf rechts oberhalb der Tastatur beim iBook ‘Tangerine’ ist von Rissen durchzogen (Abbildung A.10). Die durchscheinende farbige Kunststoffummantelung des Tragegriffes ist bei beiden Laptops nahe des Scharniers von Rissen und Sprüngen durchzogen (Abbildung 3.4).

3.1.3.5 Verfärbungen

Der gummiartige Kunststoff an der Oberseite des Deckels beim iBook ‘Graphite’ ist gelblich verfärbt. Dies lässt sich besonders im Vergleich mit der geschützteren Unterseite erkennen, die noch deutlich blau-grau ist, während die Oberseite einen gelblichen Farbstich hat. Die Gummierung an der Oberseite erscheint dadurch grünlicher. Beim iBook ‘Tangerine’ ist eine Farbveränderung in der orangenen Gummierung zwischen Ober- und Unterseite mit dem bloßen Auge nicht auszumachen. Das Akkufach auf der Unterseite des iBooks ‘Tangerine’ zeigt kreisförmige Farbveränderungen im Bereich der Lüftungsschlitze, welche eventuell durch austretende Warmluft verursacht wurden. Beim iBooks ‘Graphite’ ist das Akkufach nicht eingefärbt und Farbveränderungen sind nicht zu beobachten (Abbildung 3.5). Die Kunststoffummantelung des Kabels beider Netzteile ist vergilbt, wobei sie am iBook ‘Graphite’ stärker verfärbt ist.



Abbildung 3.3: Ausgeprägtere Rissbildung entlang des Apple-Logos an iBook 'Tangerine' (links) im Gegensatz zu schwächerer Rissbildung an iBook 'Graphite' (rechts).

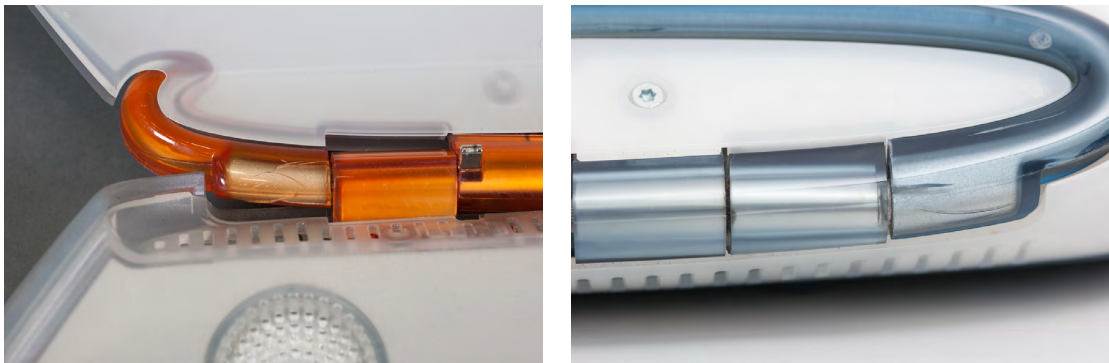


Abbildung 3.4: Rissbildung am Tragegriff nahe des Scharniers an iBook 'Tangerine' (links) und iBook 'Graphite' (rechts).

3.1.3.6 Fehlstellen

Das Apple-Logo auf der Außenseite des Deckels beim iBook 'Graphite' weist eine Fehlstelle auf. Das stilisierte farbige Blatt des „Apfels“ fehlt. Es war ähnlich einer Intarsie in eine passende Aussparung des Gehäuses eingesetzt (Abbildung A.29).

3.1.3.7 Verformungen

Möglicherweise auf Grund thermischer oder mechanischer Einwirkung während des Gebrauchs sind die ersten 11 cm nach dem Anschlussstecker der Ummantelung am Netzteilkabel von iBook 'Graphite' deformiert (Abbildung 3.6).



Abbildung 3.5: Transparent orangene Farbausführungen des Akkufachs bei iBook 'Tangerine' (links) im Gegensatz zu weiß opaker Farbigeit bei iBook 'Graphite' (rechts). iBook 'Tangerine' zeigt Farbveränderungen entlang der Lüftungsschlitze.



Abbildung 3.6: Netzteilkabel von iBook 'Tangerine' (links) im Vergleich mit deformierter Kabelleumantlung von iBook 'Graphite' (rechts).

3.2 Materialanalysen

Um erste Anhaltspunkte zu den verwendeten Kunststoffen zu finden, wurde zunächst in der Literatur nach Hinweisen gesucht. Steve Jobs äußerte sich auf der Messe 'Macworld Conference and Expo' am 21. Juli 1999 zu der Materialität des ersten iBook-Modells, als er das neue Notebook als aus Polycarbonat und Gummi hergestellt beschrieb (*Macworld NY 1999-The First iBook Introduction*, 1999). Weiter findet sich bei Kahney (2014) die Angabe, dass das Gehäuse aus hartem Polycarbonat im Verbund mit thermoplastischem Polyurethan gefertigt sei. Der Tragegriff sei zudem aus dem zähen und stoßfesten Spezialkunststoff 'Surlyn®' der Firma DuPont gefertigt.

DuPont vertreibt unter dem Namen Surlyn® über 30 verschiedene thermoplastische Harze und Kunststoffe, die u.a. für Verpackungen im Bereich Kosmetik und Lebensmittel, für

Golfbälle und industrielle Anwendungen zum Einsatz kommen. Surlyn[®] kann in Form von dünnen Kunststoffüberzügen sowie als massiver Kunststoff eingesetzt werden. Laut dem Hersteller handelt es sich um thermoplastische Materialien, die im Extrudierverfahren oder durch Formpressen weiterverarbeitet werden können und aus Säuren verschiedener Copolymere gewonnen werden. So wird beispielsweise das Copolymer Ethylen-Methacrylsäure mit Zink, Natrium, Lithium oder anderen Metallen versetzt, wodurch die Säuren neutralisiert werden und sich Polymere mit ionischen Clustern bilden (DuPont, 2015).

Um die Angaben aus der Literatur zu verifizieren wurden an beiden Laptops Kunststoffproben entnommen. Die benötigte Probengröße betrug wenige Millimeter. Die Proben wurden anschließend mittels FT-IR-(Fourier-Transform-Infrarot) Spektroskopie analysiert.

Am iBook ‘Tangerine’ während dieser Arbeit insgesamt vier Proben entnommen, drei am Notebook, eine am Netzteil:

Inv.-Nr.: 852/2008-1, 727/2004-2	Ort, Farbe, Konsistenz
Probe 1	Rückseite, CD Laufwerk, orange, weich
Probe 2	linkes Loch im Tragegriff, orange, hart, spröde
Probe 3	Rückseite, Loch für linke Schraube, weiß, hart
Probe 1 (Netzteil)	Kabelummantelung, transparent, weich

Vom iBook ‘Graphite’ wurden am Deutschen Museum bereits zwölf Materialproben sowohl von Innen als auch Außen entnommen. Von den zwölf Proben wurden nur die sieben folgenden für diese Arbeit relevanten Proben bzw. Messungen in Betracht gezogen:

Inv.-Nr.: 2012-1213T1, T2	Ort, Farbe, Konsistenz
Probe 1	Rückseite, an Schraubenloch, blau-grau, weich
Probe 2	Rückseite, an Schraubenloch, weiß, hart
Probe 3	Oberseite, blau-grau, weich
Probe 4	Oberseite, weiß, hart, spröde
Probe 5	Maustaste, blau-grau, transparent, hart
Messung 8	Netzteil, Kabelummantelung, transparent, weich, verformt
Messung 9	Netzteil, Kabelummantelung, transparent, weich

Detaillierte Berichte zu den Probeentnahmen befinden sich im Anhang B.

3.2.1 IR-Spektroskopie

Die Infrarot (IR)-Spektroskopie beruht darauf, dass bestimmte Anteile der IR-Strahlung Atome innerhalb eines Moleküls zum Schwingen bringen können. Die für die Schwingungen benötigte Energie wird von Molekülen absorbiert und fehlt im gemessenen IR-Spektrum. Anhand der entsprechenden Absorptionsbanden können so die Moleküle identifiziert werden. Zur Verdeutlichung des Effektes kann nach Brehm (2004) modellhaft angenommen werden, dass mehratomige Moleküle aus verschiedenen Massenpunkten (den Atomkernen)

bestehen, welche in einer dreidimensionalen Struktur angeordnet sind. Die chemischen Verbindungskräfte, die die Atome zusammenhalten, können in dem Modell als Federn veranschaulicht werden, die in Schwingung geraten, sobald sie einer ausreichenden Anregungsenergie in Form von IR-Strahlen ausgesetzt sind.

Um eine Anregung zu ermöglichen, muss eine periodische Änderung des Molekül Dipolmoments stattfinden. Man spricht dann von Valenzschwingungen (V.S.), wenn sich zwei angeregte Atomkerne in Richtung der „Feder“ bewegen (Abbildung 3.7). Dagegen spricht man bei Änderungen des von Valenzkräften eingeschlossenen Winkels bei dreiatomigen Molekülen von Deformationsschwingungen (D.S.) (Abbildung 3.7). Besteht ein Molekül aus Atomen mit unterschiedlichen Atommassen und/oder Bindungskräften, so kann man im gemessenen Spektrum verschieden starke Absorptionen beobachten, die bei jeweils charakteristischen Wellenzahlen auftreten.

Da eine Schwingung zwingend durch eine Änderung des Dipolmoments entstehen muss, um IR-spektroskopisch wirksam zu sein, können bei symmetrischen Molekülen (wie H_2 , N_2 , O_2) keine IR-Spektren gemessen werden. Sie zählen zu den infrarotinaktiven Verbindungen und können dagegen mit Hilfe der Raman-Spektroskopie nachgewiesen werden (Brehm, 2004).

HCl		ν	= 2886 cm^{-1}	V. S.
H ₂ O		ν_s	= 3654 cm^{-1}	V. S.
		δ	= 1595 cm^{-1}	D. S.
		ν_{as}	= 3756 cm^{-1}	V. S.
CO ₂		ν_s	= 1337 cm^{-1}	V. S.
		δ	= 668 cm^{-1}	D. S.
		ν_{as}	= 2350 cm^{-1}	V. S.
N ₂ O		$\nu_{N=O}$	= 1285 cm^{-1}	V. S.
		δ	= 589 cm^{-1}	D. S.
		$\nu_{N=N}$	= 2224 cm^{-1}	V. S.
CH ₂		ν_s		V. S.
		ν_{as}		V. S.
		δ		D. S.
		ρ		D. S.
		χ		D. S.
		τ		D. S.
CH		γ		D. S.

Abbildung 3.7: Schwingungsarten einfacher Moleküle nach (Brehm, 2004). V.S. = Valenzschwingungen, D.S. = Deformationsschwingungen.

3.2.1.1 ATR FT-IR

Die gängigste IR-Messmethode ist die Transmissions-Messung. Einige Stoffe wie Pasten, Beschichtungen von Oberflächen, Kunstfasern oder wässrige Lösungen, sind für diese Art der Messung jedoch ungeeignet. Sie werden mit Hilfe der ATR-IR Methode (= attenuated total reflection) untersucht (Brehm, 2004).

Die ATR-IR-Spektroskopie beruht auf dem physikalischen Effekt, dass ein eintretender Strahl an einer Grenzfläche unterschiedlich dichter Phasen in einen transmittierten und einen reflektierten Teilstrahl gespalten wird. Bei einem bestimmten Eintrittswinkel, dem Grenzwinkel oder kritischen Winkel, wird allerdings im dichteren Medium die gesamte Strahlung an der Grenzfläche reflektiert. Dies ist der Effekt der inneren Totalreflektion.

Laut Hellstern (1994) ist dies aber nur eine vereinfachte Darstellung, da die Strahlung (elektromagnetische Welle) ein Stück weit ins dünnere Medium eindringt und dort als Oberflächenwelle (auch evaneszierende Welle) weiterläuft bevor sie total reflektiert wird. Beim Durchlaufen des dünneren Mediums kommt es zu einer minimalen Übertragung von Energie, was zu einem Verlust von Reflektivität führt. Diesen Effekt nennt man gestörte innere Totalreflektion. Absorbiert das dünnere Medium aber nur eine bestimmte Wellenlänge des eingestrahlten Lichts, so bedeutet dies, dass die Eigenfrequenz eines Moleküls getroffen wurde und es zu einer, wie in Kapitel 3.2.1 beschriebenen, Anregung kam. Man spricht dann von abgeschwächter Totalreflektion (= ATR), welche in Abbildung 3.8 schematisch dargestellt ist.

Bei der ATR-FT-IR Spektroskopie macht man sich den Effekt der abgeschwächten Totalreflektion zu nutze. Als dichteres Medium kommen dabei Kristalle zum Einsatz, die im IR-Bereich möglichst transparent sind und einen hohen Brechungsindex besitzen. Darüber hinaus müssen sie nichtleitend sein, weshalb häufig Halbleitermaterialien verwendet werden. Kristalle, die eine langgestreckte flache Trapez-Form besitzen, haben den zusätzlichen Vorteil, dass durch sie eine Mehrfachreflektion möglich ist. Dies steigert die Empfindlichkeit der Methode (Hellstern, 1994).

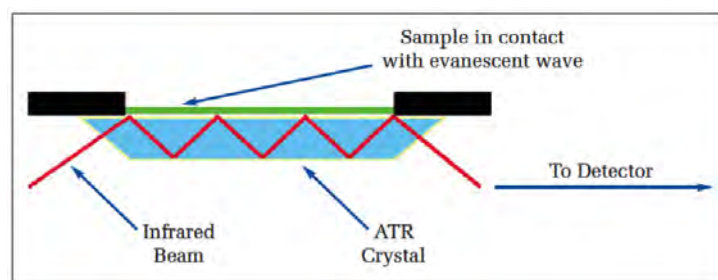


Abbildung 3.8: Mehrfachreflektion an ATR-Kristall nach (Perkin-Elmer, o. J.).

3.2.2 Resultat & Auswertung

Für die Durchführung der Messungen wurde ein Alpha FT-IR-Spektrometer der Firma Bruker mit einer ATR-Diamanteneinheit verwendet. Die Wellenzahl wurde auf einen Bereich von $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ eingeschränkt. Für jedes Spektrum wurden 64 Scans mit einer Auflösung von 4 cm^{-1} durchgeführt.

Abbildung 3.9 zeigt das Spektrum der Probe P1 am iBook ‘Tangerine’. Das Spektrum stimmt sehr gut mit den Spektren von Polyurethan-Ether der Datenbank HR Hummel Polymer and Additives sowie dem der Datenbank SAMCO EU-Projekt POPART überein.

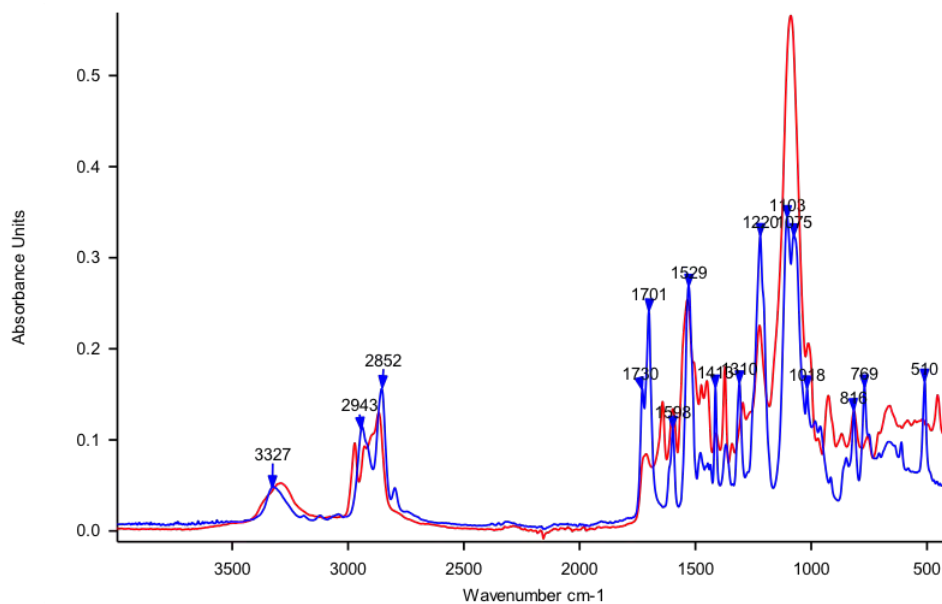


Abbildung 3.9: ATR-FT-IR-Spektrum von P1 iBook ‘Tangerine’ (blau) im Vergleich mit Referenzspektrum aus Datenbank SAMCO EU-Projekt POPART (rot).

Das FT-IR-Spektrum von Probe 1 hat Absorptionsbanden bei 2852 cm^{-1} (CH_2 Streck-schwingung), 1730 cm^{-1} und 1701 cm^{-1} (freie und hydrogen gebundene $\text{C}=\text{O}$ Streck-schwingung), 1598 cm^{-1} (NH Deformationsschwingung (McCarthy et al., 1997) oder Ar C-C Streck-schwingung (Dannoux et al., 2005)), 1529 cm^{-1} (C-N st, N-H Deformationsschwin-gung), 1413 cm^{-1} (C-C Streck-schwingung, aromatischer Ring), 1310 cm^{-1} [C-N (C(COO)-NH)], 1220 cm^{-1} (C-N Streck-schwingung), 1103 cm^{-1} (C-O-C asymmetrische Streck-schwin-gung Polyether), 1075 cm^{-1} (C-O-C asymmetrische Streck-schwingung Polyurethane, cha-rakteristische Bande für PUR-ether nach (Groot et al., 2013)), 1018 cm^{-1} (aromatischer Ring), 816 cm^{-1} und 769 cm^{-1} (CH Deformationsschwingung aromatischer Ring), wel-che nach (Gómez-Sánchez et al., 2012) typisch für aromatischen Polyurethan-Ether sind. Oosten et al. (2011) charakterisieren PUR-Ether ebenfalls anhand der Bande bei 1103 cm^{-1} sowie anhand der für PUR-Ether typischen größeren Intensität der Bande bei 1075 cm^{-1}

gegenüber der Bande bei 1220 cm^{-1} .

Bei dem Referenzspektrum handelt es sich um eine ungealterte PUR-Ether-Probe. Der Vergleich mit dem Spektrum von P1 deckt Unterschiede auf, welche auf eine fotooxidative Alterung von P1 zurückzuführen sind. Die Entstehung der Absorptionsbande bei 2943 cm^{-1} sowie der relative Zuwachs der Intensität bei 2852 cm^{-1} gegenüber der Referenzprobe deuten nach Sá et al. (2013) auf eine Vernetzung der Polymerketten hin. Die schwächere Intensität der Polyether C-O-C Streckschwingung bei 1103 cm^{-1} sowie der relative Zuwachs der Intensität bei 1730 cm^{-1} und 1701 cm^{-1} sind demnach auf die Entstehung von Methylformiat, dem Alterungsprodukt von Polyether, zurückzuführen.

Abbildung 3.10 und 3.11 zeigen die Spektren von Probe P2 und P3 von iBook ‘Tangerine’. Sie stimmen gut mit den Spektren für Polycarbonat der Datenbanken SAMCO EU-Projekt POPART und Sprouse Scientific Systems ATR überein. Ein Abgleich mit den bei Shashoua (2008b) genannten charakteristischen Peaks für Polycarbonat konnte dies bestätigen (Tabelle 3.1).

Nach Mitchell et al. (2013) deuten die Absorptionsbanden bei 1600 cm^{-1} und 1597 cm^{-1} , 1078 cm^{-1} , 1012 cm^{-1} und 1009 cm^{-1} , 826 cm^{-1} und 828 cm^{-1} auf eine aromatische Grundstruktur hin, sodass es sich wahrscheinlich um Bisphenol-A-Polycarbonat handelt.

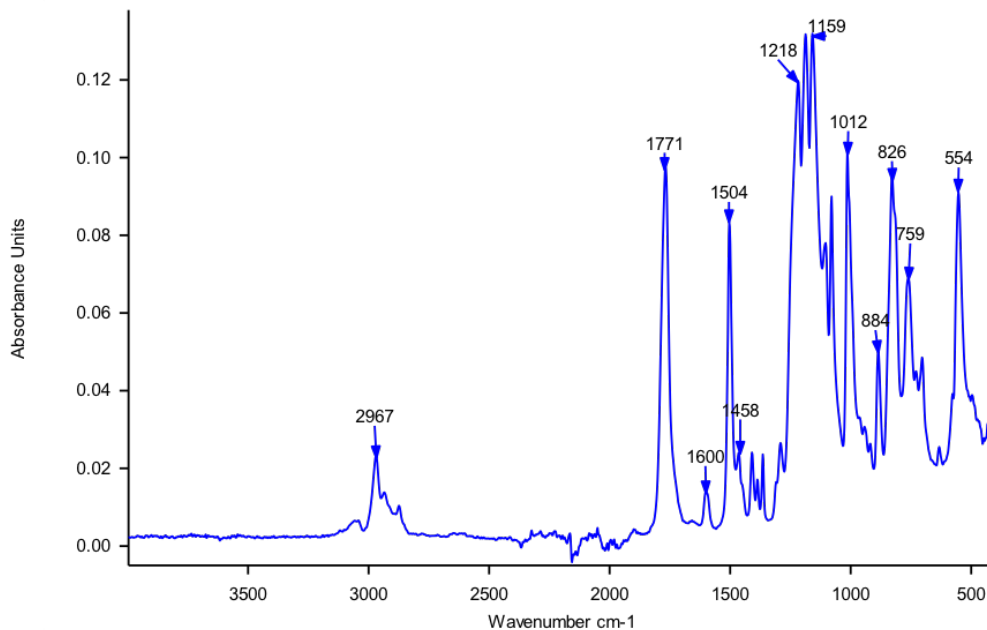


Abbildung 3.10: ATR-FT-IR-Spektrum von P2 iBook ‘Tangerine’.

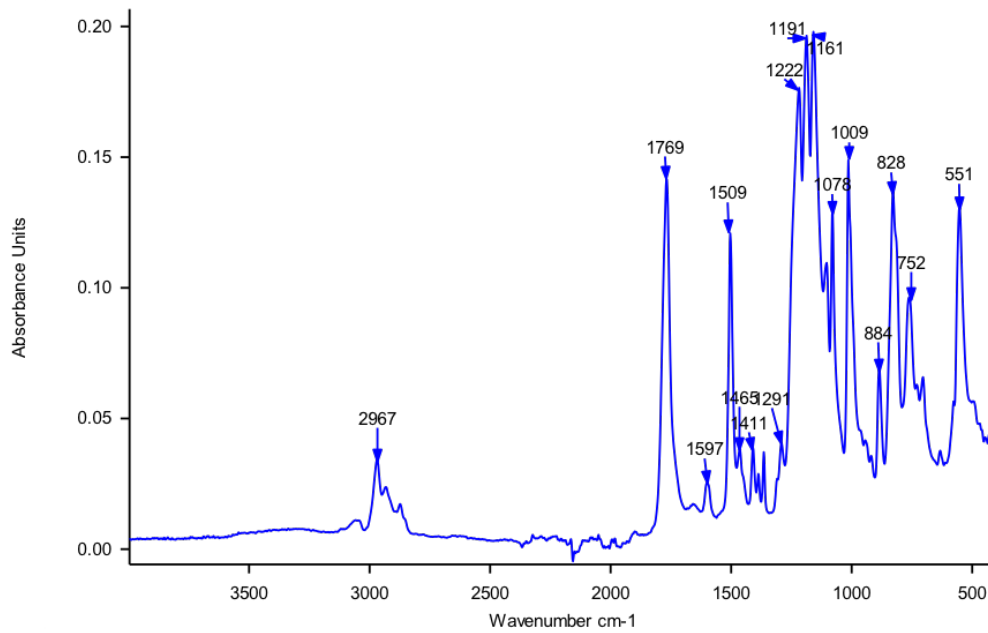


Abbildung 3.11: ATR-FT-IR-Spektrum von P3 iBook 'Tangerine'.

Wellenzahl (cm ⁻¹) P2	Wellenzahl (cm ⁻¹) P3	Zuordnung	Schwingungsart
2967	2967	CH ₃	asymmetrische und symmetrische Streckschwingung
1771	1769	C=O	Streckschwingung
1600	1597	doublet aromatischer Ring	Streckschwingung
1504	1509	Benzolring	Streckschwingung
1218	1222	C-O-C	asymmetrische Streckschwingung
	1191	=CH	in-plane Deformationsschwingung
1162	1161	=CH	in-plane Deformationsschwingung
	1078	aromatischer Ring	Streckschwingung
1012	1009	=CH	in-plane Deformationsschwingung oder Streckschwingung, aromatischer Ring (Mitchell et al., 2013)
826	828	=CH	out-of-plane Deformationsschwingung oder Streckschwingung aromatischer Ring (Mitchell et al., 2013)

Tabelle 3.1: Charakteristische Peaks für Polycarbonat nach Shashoua (2008b) und Mitchell et al. (2013) im Vergleich mit Peaks von P2 und P3 iBook 'Tangerine'.

Das FT-IR-Spektrum von Probe 1 des Netzteils vom iBook 'Tangerine' (Abbildung 3.12) stimmt gut mit dem Spektrum von weichem Polyvinylchlorid (PVC) der Datenbanken SAMCO EU-Projekt POPART und dem Referenzspektrum (Abbildung 3.13) überein.

Das FT-IR-Spektrum hat Absorptionsbanden bei 2923 cm^{-1} (CH_2 und CH Streckschwingungen), 1722 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ Streckschwingung), 1465 cm^{-1} (CH Streckschwingung), 1431 cm^{-1} (CH_2 in-plane Deformationsschwingung), 1379 cm^{-1} (CH Streckschwingung), 1259 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}$ Streckschwingung), 1117 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}$ Streckschwingung), 1073 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}$ Streck-schwingung), 960 cm^{-1} ($\text{C}-\text{C}$ Streckschwingung), 742 cm^{-1} (CH Streckschwingung) und 608 cm^{-1} ($\text{C}-\text{Cl}$ Streckschwingung), welche typisch für Weich-PVC sind (Shashoua, 2008b).

Die Absorptionsbanden bei 1722 cm^{-1} , 1465 cm^{-1} , 1379 cm^{-1} , 1259 cm^{-1} , 1117 cm^{-1} , 1073 cm^{-1} und 742 cm^{-1} können einem Phthalat-haltigen Weichmacher zugewiesen werden.

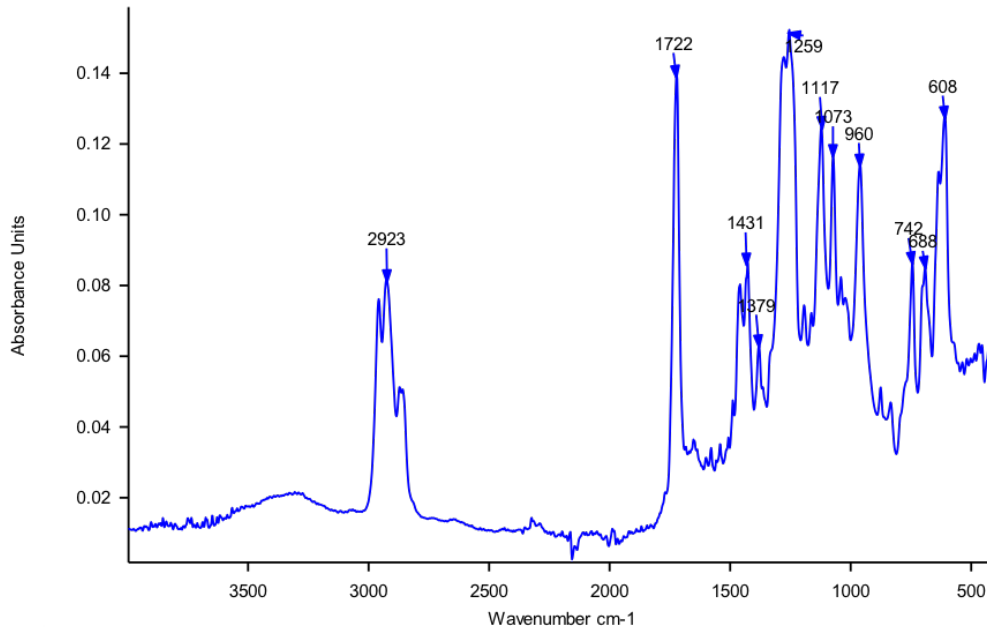


Abbildung 3.12: ATR-FT-IR Spektrum von Probe 1 (Netzteil) iBook 'Tangerine'.

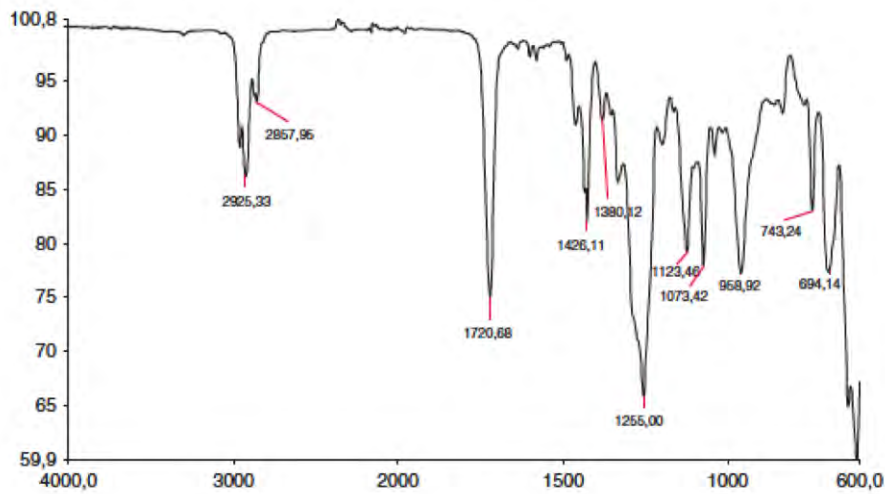


Abbildung 3.13: ATR-FT-IR Referenzspektrum für Weich-PVC nach (Shashoua, 2008b).

Die Vergleiche der Spektren von P1 (Tangerine) und P1 (Graphite) Abbildung 3.14; P2 (Tangerine) und P5 (Graphite) Abbildung 3.15; P3 (Tangerine) und P2/P4 (Graphite) Abbildung 3.16 sowie P1 Netzteil (Tangerine) und M8/M9 (Graphite) Abbildung 3.17 zeigen große Übereinstimmungen, sodass davon ausgegangen werden kann, dass beide iBooks aus denselben Kunststoffen gefertigt wurden.

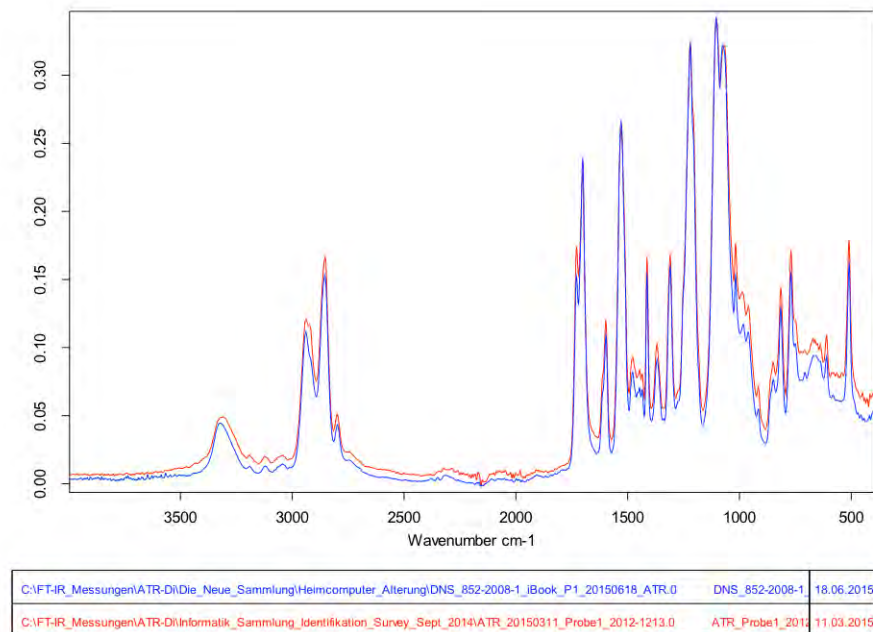


Abbildung 3.14: Vergleich der ATR-FT-IR Spektren von P1 (Tangerine) = blau und P1 (Graphite) = rot.

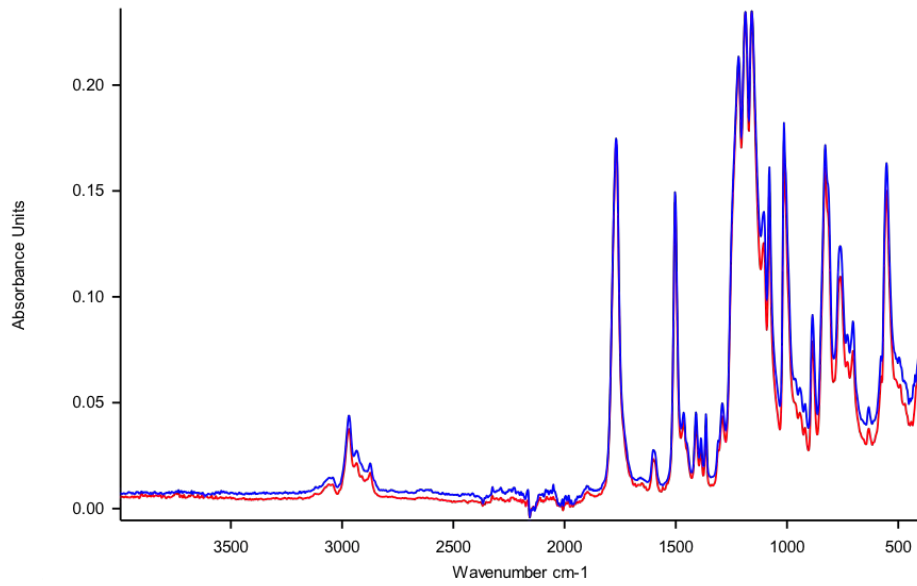


Abbildung 3.15: Vergleich der ATR-FT-IR Spektren von P2 (Tangerine) = blau und P5 = rot (Graphite).

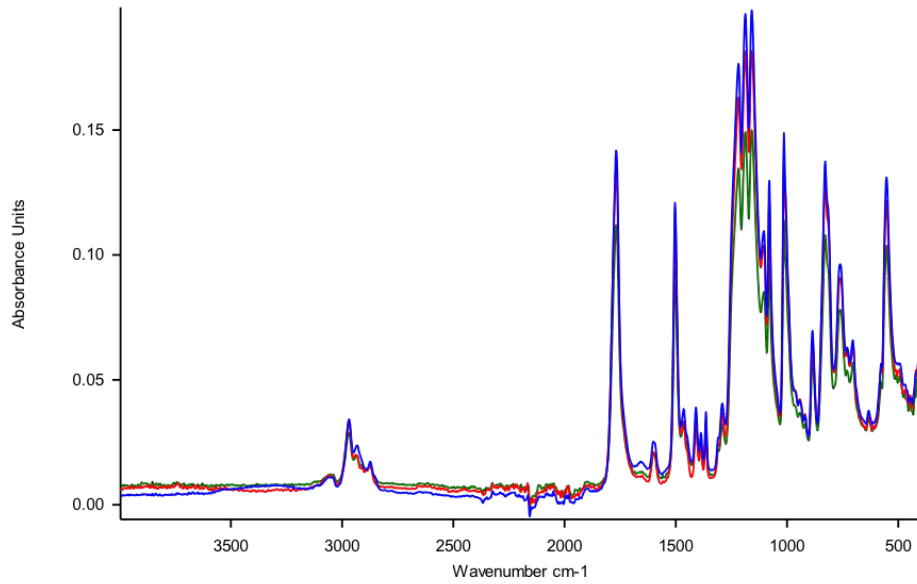


Abbildung 3.16: Vergleich der ATR-FT-IR Spektren von P3 (Tangerine) = blau und P2 = rot/ P4 = grün (Graphite).

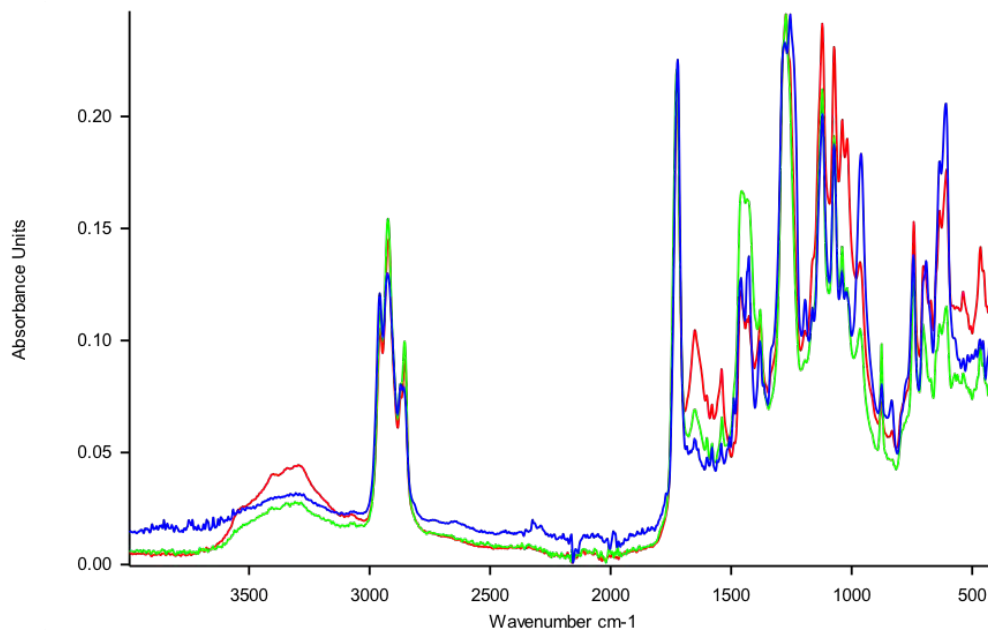


Abbildung 3.17: Vergleich der ATR-FT-IR Spektren von P1 Netzteil (Tangerine) = blau und M8 = grün/M9 = rot (Graphite).

3.2.3 Zusammenfassung der Analyseergebnisse

Die FT-IR Analysen bestätigen die Angaben aus der Literatur, wonach das weiße Gehäuse der iBooks aus einem aromatischen Polycarbonat besteht, woraus geschlossen werden kann, dass es sich um Bisphenol-A-PC handelt. Bei der farbigen Gummierung handelt es sich um Polyurethan-Ether. Der Abgleich mit einer ungealterten PUR-Ether-Probe konnte darüber hinaus eine bereits bestehende fotooxidative Alterung der Gummierung am iBook 'Tangerine' nachweisen. Die Tragegriffe sowie die farbigen Apple-Logos an den Deckel Außen- und Innenseiten bestehen ebenfalls aus Bisphenol-A-Polycarbonat. Der Vergleich von P2 ('Tangerine') und P5 ('Graphite') zeigt, dass die farbigen Touchpaddtasten ebenfalls aus einem aromatischen PC, wahrscheinlich Bisphenol-A-Polycarbonat, gefertigt sind. Die Kabelummantelung am Netzteil ist aus Weich-PVC. Als Weichmacher wurden Phthalate verwendet.

3.3 Untersuchungen zu den Kunststoffen

Aufbauend auf den Ergebnissen aus Kapitel 3.2.2 wurden gezielte Recherchen zu den nachgewiesenen Kunststoffen durchgeführt. Die Untersuchungen konzentrierten sich dabei auf das Alterungsverhalten der Kunststoffe, um mögliche Ursachen für die bereits in 3.1.3 festgestellten Schäden zu finden.

3.3.1 Polycarbonat

Polycarbonate (PC) sind thermoplastische Polymere, die nach Caseri und Beutner (2009) als Polyester aus Kohlensäure und diphatischen oder aromatischen Dihydroxy-Verbindungen betrachtet werden können. Aufgrund seiner hervorragenden optischen und mechanischen Eigenschaften ist Bisphenol-A-Polycarbonat der wichtigste Vertreter dieser Stoffklasse. Bei Bisphenol-A-Polycarbonat handelt es sich um linear verzweigte Moleküle mit folgender Struktur:

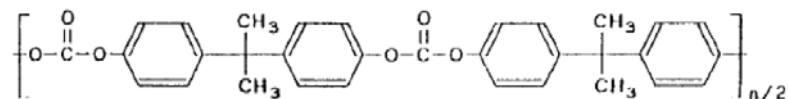


Abbildung 3.18: Allgemeine Strukturformel für Bisphenol-A-Polycarbonat nach (Wings, 1992).

Das in der Kette liegende aromatische System verleiht der Kette eine besondere Steifheit, auf die sich viele Eigenschaften wie Löslichkeit, Schmelzverhalten, Kristallisation sowie diverse mechanische und elektrische Eigenschaften zurückführen lassen (Schnell, 1967). Die wichtigsten physikalischen und chemischen Eigenschaften von Bisphenol A-Polycarbonat nach (Domininghaus, 2005) und (Caseri & Beutner, 2009):

- in allen wichtigen Farbtönen transparent, transluzent und gedeckt mit großer Farbtiefe einfärbbar
- mit Hilfe von alkalifreien Polierpasten leicht auf Hochglanz polierbar
- Brechungsindex: 1,59 (bei 20 °C)
- Glasübergangstemperatur: 150 °C
- Schmelzbereich: 220 - 260 °C
- Dichte: 1,2 g/cm³
- Reißfestigkeit: > 65 N/mm²
- hohe Festigkeit, Steifheit, Härte und Zähigkeit im Bereich von -150 °C bis 135 °C

- hohe Kerbempfindlichkeit
- Thermischer Ausdehnungskoeffizient, längs (23 bis 5 °C): $6,5-7 \cdot 10^{-5}/K$
- gute elektrische Isoliereigenschaft, die auch bei Feuchtigkeitseinwirkung nicht beeinträchtigt wird
- Wasseraufnahme von Bisphenol-A-PC bei 23 °C und 65% relativer Feuchte beträgt 0,2%, bei direkter Wasserlagerung 0,36%
- Kristallitanteil von höchstens 5% (amorph)
- kann durch Spritzgießen, Extrudieren oder Warmumformen verarbeitet werden

3.3.1.1 Chemikalienbeständigkeit

PC ist sehr beständig gegen Wasser bei Raumtemperatur, Wasser oberhalb von 60 °C führt allerdings zum Abbau des Kunststoffes (Hydrolyse) und zur Bildung von Spannungsrissen, sobald das Material beansprucht wird oder wenn bereits Eigenspannungen vorhanden sind (Domininghaus, 2005). Eine Übersicht zu der Beständigkeit von Polycarbonat gegenüber den gängigen Lösemittelklassen bietet Tabelle 3.2.

Medium	Beständigkeit
Säuren schwach	A
Säuren stark	B
oxidierende Säuren	B
Flußsäure	B
Laugen schwach	C
Laugen stark	C
Lösungen anorganischer Salze	B
Halogene (trocken)	A
aliphatische KW	A
chlorierte KW	C
Alkohole	B
Ester	B
Ketone	B
Ether	C
Aldehyde	C
Amine	C
organische Säuren	B
aromatische KW	C
Fette, Öle	A
ungesättigte chlorierte KW	C
Terpentin	A

Tabelle 3.2: Chemikalienbeständigkeit von Polycarbonat nach (Domininghaus, 2005). A = beständig, B = durchschnittlich beständig, C = nicht beständig.

3.3.1.2 Alterungsverhalten

Der Abbau von PC vollzieht sich am aktivsten durch Licht der Wellenlängen 285-305 nm und 320-360 nm. Eine Folge des Abbaus sind Vergilbung, die bei zunehmender Bestrahlung in eine hellbraune Färbung übergeht. Nach Doležel (1978) beschränken sich die Verfärbungen allerdings auf die Oberfläche (bis 0,1 mm Tiefe), da die inneren Bereiche unverändert blieben. Während der Bestrahlung können kleine Risse entstehen, die die Oberfläche matt erscheinen lassen. Insgesamt kommt es zur Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften aufgrund zunehmender Versprödung, Abnahme des Molekulargewichts und Zunahme der Oberflächenrisse.

Gegen thermische Zersetzung ist PC relativ gut beständig, ein Abbau findet bei Ausschluss von Sauerstoff erst ab 320 °C statt. In Gegenwart von Sauerstoff setzt der Abbau schon bei niedrigeren Temperaturen ein, sodass PC höchstens bis maximal 130 °C beansprucht werden sollte (Doležel, 1978).

3.3.1.3 Spannungsrissverhalten

PC neigt, wie viele amorphe Thermoplaste, zur Spannungsrissbildung. Darunter versteht man die gleichzeitige Einwirkung eines Mediums und einer Spannung, welche zu einer Rissbildung im Kunststoff führen. Ist das Medium nicht anwesend, führen die Spannungen alleine allerdings nicht zur Rissbildung, ebenso wenig führt das Medium allein, ohne anliegende Spannung, zu einem Riss (Bonten, 2014). Im Fall von PC führt bei vorhandener Spannung das Einwirken lösender oder quellender Medien wie Aceton, Ketone, aromatische Kohlenwasserstoffe, Terpentin, Tetrachlorkohlenstoff oder Wasser oberhalb von 60 °C zu Rissen.

Die Entstehung eines Spannungsrisses ist schematisch in Abbildung 3.19 dargestellt. Schon eine Verunreinigung kann zum lokalen Eindringen des Mediums und lokaler Schwächung führen. Bei zugleich anliegender Spannung (auch Eigenspannung) führt diese Schwächung zu kleinen Rissen (Crazes) und schließlich zu einer makroskopischen Rissbildung.

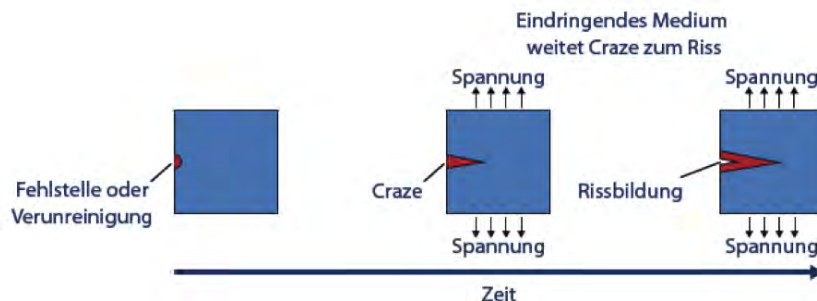


Abbildung 3.19: Modell zur Spannungsrissbildung in Kunststoffen nach (Bonten, 2014).

Rogallas Untersuchungen (1982) zur Spannungsrissbildung in Kunststoffen kommen zu

dem Ergebnis, dass die Gefahr einer Spannungsrissbildung umso größer wird:

- je gröber das Gefüge, d.h., je größer die Strukturgrenzen sind
- je höher die lokalen Dehnungen aus äußeren und inneren Kräften sind
- je besser die Benetzung durch ein Medium ist
- je größer die Quellungs- und Lösungstendenz ist
- je ähnlicher das einwirkende Medium den Monomeren bzw. Oligomeren oder eingelagerten Hilfsstoffen wird

Da die Gefahr der Rissbildung von der ausgebildeten Struktur des Kunststoffes bzw. von Inhomogenitäten im Werkstoff abhängt, fällt dem Herstellungsprozess eines Kunststoffobjektes eine zentrale Bedeutung zu. Faktoren wie Orientierung der Moleküle, eingefrorene Eigenspannungen und Kristallisationszustand wirken sich auf die Struktur aus. Alle drei Faktoren werden ihrerseits durch Zeit und Temperatur stark beeinflusst (Bonten, 2014).

Eigenspannungen im Material wirken sich wie eine belastende mechanische Vorspannung aus. Diese können beispielsweise bei Spritzgussteilen nach der Formgebung und dem Abkühlvorgang im Spritzgießwerkzeug aufgrund ungleichmässiger Wandungstemperatur oder behinderter Schwindung entstehen (Domininghaus, 2005). Molekülorientierungen in Schmelze und Festkörper sind Hauptausrichtungen von Polymerketten, die längs der Kette (Hauptvalenzkräfte) zu höherer und quer dazu (Nebervalenzkräfte) zu weniger Festigkeit und Steifigkeit führen. Orientierungen haben Auswirkung auf die Schwindung von Bauteilen. Die orientierten Bereiche einer Schmelze können dichter aneinandergelegt abkühlen. Dies beeinflusst auch die Schwindung in orientierten Bereichen: längs der Orientierung weniger, quer zur Orientierung mehr Schwindung (Bonten, 2014).

Bei Kahney (2014, S. 179) finden sich Details zur Fertigung der iBooks, wonach „*die Herstellung* [für die Ingenieure und Designer] *große Herausforderungen mit sich brachte*“. Das harte Polycarbonat-Gehäuse der iBooks wurde fest mit dem elektronischen Innenleben verbunden, was das Problem „*der Form und Schichtung von Plastik und darunter liegendem Blech*“ bedeutete. Zudem „*machte die komplexe Muschelform beim Gießen großen Ärger*“, da sich die Form in mehrere Richtungen zurückziehen musste, bevor sie aus der Gießform entnommen werden konnte. Anfangs bildeten sich beim Abkühlen des Polycarbonats nach dem Herausnehmen allerdings Mikrorisse.

Der Tragegriff musste laut Kahney (2014) durch ein Spezialverfahren hergestellt werden. Bei dem Gießverfahren, das als MIM-Spritzgießen bekannt ist, wurde zunächst das Metallteil aus Magnesium in die Gussform eingeführt und danach der gefärbte Polycarbonat-Kunststoff darum gegossen. Da Metall und Kunststoff unterschiedlich schnell abkühlten, zersprang das Teil anfangs sobald die Gussform geöffnet wurde. Die Form und die Mischung der Kunststoffkomponenten mussten fortlaufend angepasst werden, bis die Herstellung des Griffs gelang.

Die Schilderungen lassen vermuten, dass bei der Herstellung der iBooks Eigenspannungen im Material entstanden, welche die Bildung der jetzt zu beobachtenden Risse im Polycarbonat begünstigten.

Dass Craze- und Rissbildung auch ohne Umwelteinflüsse stattfindet wird bei Berlich (2005) näher beschrieben. Amorphe Thermoplaste wie PC neigen demnach schon bei alleinigem Einwirken einer mechanischen Kraft zur Craze- und Rissbildung. Crazes entstehen an lokalen Spannungskonzentrationen und wachsen bei bestehender Spannung senkrecht zur Belastungsrichtung. Diese lokalen Spannungskonzentrationen können durch Fehlstellen oder Verunreinigungen im Werkstoffgefüge entstehen. An ihnen kann das Gefüge aufreißen, so dass Hohlräume entstehen, die sich bei andauernder Belastung zu Rissen ausweiten können.

Akhurst (2008) betont die Notwendigkeit eines durchdachten Entwurfs für Designobjekte, die äußeren Spannungen ausgesetzt sind, um die Entstehung von Rissen zu vermeiden. Eine geeignete Form, mit passenden Dimensionen kombiniert mit einer sinnvollen Materialwahl sind dabei essenziell. Werden kleine Details wie scharfe Ecken, kleine Löcher und Verstärkungsrippen unbeachtet gelassen, so können dort örtliche Spannungskonzentrationen entstehen, die um ein Vielfaches höher sind als im Rest des Werkstoffes. Solche Spannungskonzentrationen führen zu einem vorzeitigen Bruch des Werkstoffs, zu örtlichen Deformationen und/oder Verfärbungen im unter Spannung stehenden Bereich. Um Spannungskonzentrationen zu vermeiden, empfiehlt Akhurst (2008) den Verzicht auf abrupte Wechsel der Form sowie der Orientierungen im Formstück während der Herstellung.

Für die Entstehung der Risse unterhalb des Displays an beiden iBooks bedeutet dies, dass die Form sowie die Lage des Logos die Rissbildung begünstigte. Die spezielle Form, bestehend aus einer Kombination von spitzen Ecken und Kurven, führte zu lokalen Spannungskonzentrationen, ebenso die Orientierungen der Moleküle an der Kante zwischen Logo und umgebendem weißen Gehäuse. Wie von einer Werkstofftechnikerin¹ auf Nachfrage bestätigt wurde, konnten die beim Auf- und Zuklappen des Laptops auf das Gehäuse, insbesondere auf den verhältnismässig schmalen Bereich unterhalb des Displays, wirkenden Spannungen sich nicht hinreichend verteilen bzw. abbauen. Dies führte dazu, dass sich an den Stellen mit erhöhter Spannungskonzentration Crazes und Risse bildeten, wie sie entlang des Logos beobachtet werden können. Da im Gegensatz dazu an der Außenseite des Deckels eine Spannungsverteilung über eine größere Fläche hinweg möglich ist, sind entlang des dort befindlichen Logos keine Risse entstanden (Abbildung 3.20).

Folglich sind die Risse während des Gebrauchs der Laptops entstanden und nicht eine Folge unsachgemäßer Lagerung. Dies lässt auch vermuten, dass das iBook ‘Graphite’ weniger genutzt wurde als das iBook ‘Tangerine’ bevor es ins Deutsche Museum kam, da die Rissbildung am ersten Gerät schwächer ausgeprägt ist. Die Entstehung der Risse wurde allerdings durch den Entwurf der Laptops, die Form des Logos, den Herstellungsprozess und die Wahl des Kunststoffes bei beiden Geräten begünstigt.

¹Dr. Paola Bruno, Material Engineer/Material Specialist bei Magna Interiors (Europe) GmbH.



Abbildung 3.20: Risse im Polycarbonat an Apple-Logo unterhalb des Displays (links). Das Apple-Logo hat im umgebenden Polycarbonat an der Außenseite des Deckels dagegen keine Rissbildung verursacht (rechts).

3.3.2 Polyurethan-Elastomere

Unter Polyurethanen (PUR) fasst man eine Stoffgruppe von Polymeren zusammen, deren Wiederholungseinheiten durch eine Urethan-Gruppe (-NH-CO-O-) verknüpft sind. Sie werden durch die Reaktion zwei- (Diol) oder höherwertigerer Alkohole (Polyol) und Diisocyanaten gewonnen (Uhlig, 2001).

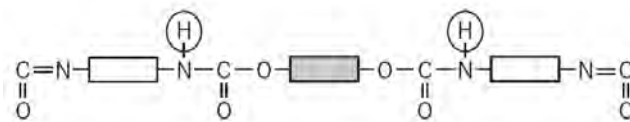


Abbildung 3.21: Allgemeine Struktur von Polyurethan nach (Bonten, 2014).

Polyurethane können in mehreren Zustandsformen auftreten: Als Elastomere (vernetzte und thermoplastische), Weichschaumstoffe, Hartschaumstoffe, Strukturschaumstoffe, Gießharze, Lacke und Klebstoffe und lineare Polyurethane. Im Zuge dieser Arbeit werden das Alterungsverhalten und die Eigenschaften von thermoplastischen PUR-Elastomeren näher betrachtet.

Wie alle PUR-Typen ist auch thermoplastisches PUR ein Polyaddukt aus Polyisocyanaten und Polyolen. Die charakteristischen gummiähnlichen Eigenschaften sind auf den segmentierten Aufbau der Makromoleküle zurückzuführen. Das Hartsegment wird aus Diisocyanat und einem Kettenverlängerer, beispielsweise MDI (4,4-Diisocyanat-diphenylmethan) + 1,4-Butandiol, gebildet. Die langkettigen Polyole übernehmen die Funktion eines chemisch gebundenen Weichmachers und bilden das Weichsegment (Uhlig, 2001).

PUR-Ether werden durch die Verwendung von Polyetherpolyolen gewonnen, PUR-Ester analog durch die Verwendung von Polyesterpolyolen. Letztere werden in deutlich geringe-

rem Maße als Polyetherpolyole verwendet, da sie in der Herstellung teurer und bei vergleichbarer Kettenlänge viel höher viskos sind als Polyether (Uhlig, 2001).

Allgemeine Eigenschaften von PUR-Elastomeren sind (nach Domininghaus, 2005):

- hohe Zugfestigkeit und Reißdehnung
- hohe Flexibilität
- hohe Dauergebrauchstemperatur
- geringe bleibende Verformung bei statischer und dynamischer Beanspruchung
- hohe Weiterreißfestigkeit
- Weichmacher-frei

3.3.2.1 Chemikalienbeständigkeit

Für die Chemikalienbeständigkeit von PUR ist die O-C-N-Gruppe von entscheidender Bedeutung. Ihr Vorhandensein bewirkt die Anfälligkeit gegenüber Säuren, Alkalien, welche hydrolytische Spaltungen bewirken, sowie die Unbeständigkeit gegenüber Oxidationsmitteln. Wasser und Lösungen nichtoxidierender anorganischer Salze rufen keine Veränderung der chemischen Struktur hervor. Generell sind linear vernetzte PURE beständiger als solche mit linearer Struktur (Doležel, 1978). Eine Übersicht über die Beständigkeit von PUR-Elastomeren hinsichtlich ausgewählter Medien bietet Tabelle 3.3.

3.3.2.2 Alterungsverhalten

PUR-Gummi (Elastomer) ist gegen Bewitterung nur eingeschränkt beständig. Im Übrigen ist die Beständigkeit von der genauen Zusammensetzung, den verwendeten Rohstoffen sowie der chemischen Struktur abhängig. Polyurethan-Elastomere verhalten sich bei der Alterung in der Regel wie Polyurethanwerkstoffe, Langzeitversuche zur Bewitterungsbeständigkeit von PUR-Gummi liegen allerdings nicht vor. PUR-Elastomere zählen zu den bewitterungsbeständigsten Elastomeren, wobei Polyurethan-Ester als beständiger gegen atmosphärische Einflüsse gelten als Polyurethan-Ether (Doležel, 1978).

Nach Waentig (2004) tritt nach verhältnismässig kurzer Zeit eine für die Alterung aller PUR-Typen charakteristische Vergilbung auf, die bei den auf Basis von ungesättigten Isocyanaten hergestellten Typen am stärksten ist. Farbveränderungen dieser Art lassen sich beim iBook 'Graphite' aus dem Bestand des Deutschen Museums mit bloßem Auge bereits beobachten. Die Polyurethan-Gummierung der Oberseite ist deutlich grünlicher als die der Unterseite, was auf eine Vergilbung der PUR-Gummierung der Oberseite zurückzuführen ist (Abbildung 3.22). Hauptursache der Eigenschaftsveränderungen sind die Folgen des

Medium	Beständigkeit
Wasser kalt	A
Wasser heiß	B
Säuren schwach	B
Säuren stark	C
oxidierende Säuren	C
Flußsäure	C
Laugen schwach	B
Laugen stark	B
Lösungen anorganischer Salze	A
Halogene (trocken)	C
aliphatische KW	A
chlorierte KW	C
Alkohole	A
Ester	C
Ketone	C
Ether	A
organische Säuren	C
aromatische KW	C
Fette, Öle	C
ungesättigte chlorierte KW	C

Tabelle 3.3: Chemikalienbeständigkeit von Polyurethanelastomeren nach (Domininghaus, 2005). A = beständig, B = durchschnittlich beständig, C = nicht beständig.

fotooxidativen Abbaus des PURs, der durch Licht der Wellenlängen 334 - 411 nm hervorgerufen wird. Anhand der FT-IR-Analysen konnte auch an der Gummierung von iBook 'Tangerine' eine bestehende fotooxidative Alterung nachgewiesen werden. Bei der Reaktion werden hauptsächlich die C-N-Doppelbindungen gespalten, was zur Radikalbildung führt. Die entstandenen Radikale liefern weitere Reaktionsprodukte, welche für jeden PUR-Typ charakteristisch sind (Doležel, 1978).



Abbildung 3.22: Vergleich der stärker vergilbten PUR-Gummierung an der Oberseite im Gegensatz zur weniger stark vergilbten Unterseite von iBook 'Graphite'.

Neben der fotolytischen Reaktion laufen zusätzlich hydrolytische Reaktionen ab. Externe

Faktoren können zudem die Abbau-Reaktionen beschleunigen. So beeinflusst laut Doležel (1978) die Anwesenheit von Feuchtigkeit die Fotooxidation von PUR-Ester. Zudem können Ammoniak und Katalysatorrückstände die Alterung von PUR beschleunigen (Kerr & Batcheller, 1993). Die Stabilität gegenüber Licht wird hauptsächlich durch die bei der Herstellung verwendeten Diisocyanate und Polyole beeinflusst. Aromatische Diisocyanate, welche in der Gummierung der iBooks nachgewiesen werden konnten, reagieren wesentlich empfindlicher auf oxidative Prozesse als aliphatische, weshalb letztere weniger stark gelben (Waentig, 2004).

Hinsichtlich eines Befalls durch Bakterien und Schimmelpilze ist PUR eines der am wenigsten beständigen Polymere. Die mechanischen Eigenschaften werden bei der Zersetzung durch die Mikroorganismen stark verändert. Tendenziell sind die PUR-Ether beständiger als die PUR-Ester (Doležel, 1978).

3.3.3 Polyvinylchlorid

Polyvinylchlorid (PVC) ist ein Polymer, welches durch radikalische Homopolymerisation von Vinylchlorid erzeugt wird und folgende Struktur besitzt:

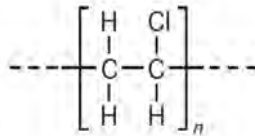


Abbildung 3.23: Allgemeine Strukturformel für PVC nach (Bonten, 2014).

Die Makromoleküle sind nicht streng linear: Sie haben in Abhängigkeit vom Monomerumsatz und der Polymerisationstemperatur ca. 3–20 kurze Seitenketten pro 1000 Kohlenstoff-Atome. Technisches PVC hat Molmassen von ca. 30000–130000g/mol (Brüggemann & Beutner, 2009). Das Polymer ist im wesentlichen amorph mit einer Kristallinität von ca. 5 % (Domininghaus, 2005).

PVC wird großtechnisch durch Emulsions-, Suspensions- und Massepolymerisation gewonnen. Die verschiedenen Herstellungsverfahren beeinflussen hauptsächlich das äußere Erscheinungsbild wie Korngröße, Kornform und die Weichmacheraufnahme. Viel entscheidender wirken sich auf die Eigenschaften des Kunststoffes jedoch Zusatzstoffe wie Stabilisatoren, Gleitmittel, Füllstoffe, Pigmente, Treibmittel, Antistatika, Flammenschutzadditive, UV-Stabilisatoren und Fungizide aus. PVC kann durch Extrudieren, Kalandrieren, Blasformen, Spritzgießen, Pressen oder Sintern verarbeitet werden (Domininghaus, 2005).

Bei PVC mit einem Weichmachergehalt von 0–12 % spricht man von Hart-PVC (PVC-U), bei über 12 % von Weich-PVC (PVC-P) und bei einem sehr hohem Weichmacher-Gehalt von Plastisolen oder PVC-Pasten (Brüggemann & Beutner, 2009). Die Zugabe von Weichmachern bewirkt, dass die Dipolkräfte zwischen den Makromolekülen von polarem PVC-U

gelockert bzw. aufgehoben werden, da sich der Abstand zwischen den Ketten vergrößert. Es werden zwei Typen von Weichmachern unterschieden: die inneren und die äußeren Weichmacher. Bei Innerer Weichmachung werden während der Polymersynthese Blockpolymere mit abstandshaltenden Seitenketten gebildet, welche die Beweglichkeit der Polymerketten vergrößern. Die Äußere Weichmachung beruht auf physikalischen Kräften nicht auf chemischen. Oft werden den Polymeren niedermolekulare Stoffe hinzugefügt, welche sich aufgrund unterschiedlicher Polaritäten schlecht vermischen lassen. Äußere Weichmacher sind nur durch Nebenvalenzkräfte gebunden, weshalb sie zur Migration an die Oberfläche neigen (Bonten, 2014).

Kennzeichnende Eigenschaften von Weich-PVC (nach Dominghaus, 2005):

- in weiten Grenzen einstellbare Flexibilität
- thermischer Ausdehnungskoeffizient, längs (23-55 °C): 18 bis 25 $10^{-5}/K$
- Brechungsindex: 1,52 bis 1,55
- Zähigkeit je nach Weichmacherart, sehr temperaturabhängig
- durchscheinend bis transparent
- gute elektrische Eigenschaften im Niederspannungs- und Niederfrequenzbereich

Die mechanischen Eigenschaften von Weich-PVC sind neben der Art und Menge des Weichmachers hauptsächlich von den Inhaltsstoffen abhängig.

3.3.3.1 Chemikalienbeständigkeit

PVC ist bis 60 °C gut beständig gegen: Wasser, wässrige Salzlösungen, Säuren und Alkalien. Gegen starke Oxidationsmittel, aromatische Kohlenwasserstoffe und polare Lösemittel ist PVC nicht beständig. Eine Übersicht zur Beständigkeit von Weich-PVC gegenüber ausgewählter Medien ist in Tabelle 3.4 zusammengestellt.

PVC neigt bei Kontakt mit Methanol, Ethanol, Ethylacetat, Naphthalindämpfen zu Spannungsrisbildung. Die Chemikalienbeständigkeit ist bei Weich-PVC generell geringer als bei Hart-PVC (Doležel, 1978), wobei die Zugabe von Spezialweichmachern die Beständigkeit gegenüber einzelnen chemischen Verbindungen sogar erhöhen kann (Dominghaus, 2005).

3.3.3.2 Alterungsverhalten von Weich-PVC

Umwelteinflüsse wie Sonneneinstrahlung, Temperatur, Niederschläge und Ozon führen bei Weich-PVC zu Verfärbungen, Abspaltung von Chlorwasserstoff, Veränderung des Molekulargewichts, der mechanischen und elektrischen Eigenschaften sowie zu Zersetzung oder

Medium	Beständigkeit
Säuren schwach	A
Säuren stark	C
oxidierende Säuren	C
Flußsäure	C
Laugen schwach	A
Laugen stark	C
Lösungen anorganischer Salze	A
Halogene (trocken)	C
aliphatische KW	C
chlorierte KW	C
Alkohole	C
Ester	C
Ketone	C
Ether	C
Aldehyde	A
Amine	A
organische Säuren	B
aromatische KW	C
Fette, Öle	B
ungesättigte chlorierte KW	C
Terpentin	C

Tabelle 3.4: Chemikalienbeständigkeit von Weich-PVC nach (Domininghaus, 2005). A = beständig, B = durchschnittlich beständig, C = nicht beständig.

Migration von Weichmachern. Um die Stabilität von PVC gegenüber atmosphärischen Einflüssen beurteilen zu können ist die Kenntnis über die bei der Herstellung verwendeten Zusätze entscheidend, da diese das Alterungsverhalten stark beeinflussen. Bei Weich-PVC ist es neben der Qualität des verwendeten Polymers primär die Zusammensetzung und die Menge des Weichmachers, der die Alterung des Kunststoffes prägt (Doležel, 1978).

Wie bei Doležel (1978) beschrieben spielen der quantitative Anteil sowie die genaue Zusammensetzung des Weichmachers bei der Farbveränderung von Weich-PVC eine entscheidende Rolle. Besonders zum Tragen kommt dies bei hohem Weichmacher-Anteil, wobei der Einfluss des Weichmachers wiederum von der Qualität des verwendeten PVCs abhängt. Weich-PVC mit 5 % Weichmacher-Anteil bilden bei Bewitterung beispielsweise eine weiße Verfärbung aus, während PVC mit 12 % Weichmacher-Zusatz sich dunkel färbt. Bei hohem Weichmachergehalt kann es sogar zu Schwärzung der Oberfläche verbunden mit punktförmigen Flecken kommen. Neben Farbveränderungen können bei der Bewitterung von Weich-PVC auch Oberflächenrisse entstehen.

Hauptschadensursache bei der Alterung von Weich-PVC ist das Ausdünsten von Weichmachern an die Oberfläche des Kunststoffes. Dabei können Zersetzungsprodukte migrieren und sich als klebriger Film ablagern. Im Fall von Dibutyl- und Dioctyl-Phthalat machen sie sich durch einen süßlichen Geruch bemerkbar (Quye & Williamson, 1999). Weichmacher können nach Waentig (2004) durch übliche Lösemittel und längeres Einwirken herausgelöst werden. Sale (1988) konnte nachweisen, dass fast alle polaren als auch unpolaren Lösemittel

zu einem Gewichtsverlust bei Weich-PVC führen. Die Proben wurden zu Versuchszwecken und unter ständiger Gewichtskontrolle über mehrere Tage in flüssige Medien getaucht. Die Versuche zeigten, dass Aceton, die aromatischen Kohlenwasserstoffe, ebenso wie Wasser + 1 % Triton X-100 (Netzmittel), die größten Gewichtsverluste verursachten. Auch waren die Proben härter als vor dem Eintauchen über zwölf Tage. Aus den Beobachtungen lässt sich folgern, dass durch den Kontakt mit Lösemitteln Weichmacher aus dem Kunststoff gelöst wurden. Der entstandene Film bindet wiederum Staub und Schmutz, welcher ein Nährboden für Mikroorganismen sein kann. Schimmelbefall beispielsweise führt zu einer Abnahme der Weichmacherkonzentration im Kunststoff, da sich Schimmel von Weichmachern ernähren kann. Doležel (1978) gibt zu bedenken, dass die Ablagerung von Weichmachern an der Oberfläche in Einzelfällen durchaus nützlich sein kann, da sie den Kunststoff vor weiterem fotochemischen Abbau schützt.

Die mechanischen Eigenschaften von Weich-PVC verändern sich bei der Alterung abhängig von der Reinheit des Weichmachers und der Qualität der Polymere. Auch reagieren Gemische aus Suspensions-PVC empfindlicher gegenüber Sonnenlicht als Emulsions-PVC, welche im Gegensatz aber unbeständiger gegen Feuchtigkeit und Niederschläge sind. Generell werden die mechanischen Eigenschaften umso stärker beeinflusst je höher der Anteil an Weichmachern ist, wobei sich schon niedrige Konzentrationen von 5-12 % negativ auswirken können. Der Verlust von Weichmachern hat oft zur Folge, dass Risse entstehen, da das Material schrumpft und sich innerhalb des Kunststoffs Spannungen aufbauen. (Quye & Williamson, 1999)

PVC wird durch Licht mit Wellenlängen über 300 nm fotolytisch abgebaut. Die chemischen Veränderungen während der Fotolyse zeichnen sich durch die Abspaltung von Chlorwasserstoff, Wasser, Kohlendioxid, durch die Entstehung von Doppelbindungen und Änderungen des Molekulargewichts aus. Die Anwesenheit konjugierter Doppelbindungen hat eine zunehmende Absorption von Licht mit längeren Wellenlängen zur Folge, die so weit vorschreiten kann, bis sich das Spektrum in den Bereich des sichtbaren Lichts verschiebt. Der Effekt drückt sich in einer Verfärbung des PVCs aus (Doležel, 1978).

Bei Wärmeeinwirkung wird PVC nicht depolymerisiert, stattdessen findet eine Veränderung der chemischen Struktur statt, da niedermolekulare Produkte abgespalten werden. Die Zersetzung beginnt bei Temperaturen um 100 °C und ihre Geschwindigkeit nimmt oberhalb 120 °C stark zu. Abspaltungsprodukt des thermischen Abbaus ist hauptsächlich Chlorwasserstoff. Gleichzeitig findet eine Verfärbung des Materials und eine Veränderung des Molekulargewichts sowie der mechanischen und elektrischen Eigenschaften statt. Die Änderungen der mechanischen Eigenschaften beim thermischen Abbau sind allerdings nicht so ausgeprägt wie die Änderungen bei der fotochemischen Oxidation (Doležel, 1978). Die Ausdünstungsrate von Weichmachern steht ebenfalls im direkten Zusammenhang mit der Oberflächentemperatur des Kunststoffes (Shashoua, 2008a).

Bei dem klebrigen Oberflächenfilm an der PVC-Kabelummantelung des Netzteils von iBook 'Graphite' handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um ausmigrierte Weichmacher. Die Migration des Weichmachers könnte durch einwirkende hohe Temperaturen während des Gebrauchs des Laptops auf das Kabel verursacht worden sein. Erhöhte Temperatu-

ren würden auch die Strukturänderung der Kabelummantelung erklären. Ebenso könnte eine Kombination aus hohen Temperaturen und dem Verlust von Weichmachern die Deformation verursachen, wobei das Ausdünsten der Weichmacher wiederum durch erhöhte Oberflächentemperaturen begünstigt wird.

3.4 Empfehlungen zur Konservierung und Lagerung

3.4.1 Notebook

Als präventive Maßnahme ist eine regelmäßige Oberflächenreinigung unerlässlich. Im Fall von Polycarbonat und Polyurethan ist eine Trockenreinigung einer Reinigung mit LösemitteIn vorzuziehen. Ein Abstauben der Kunststoffe sollte mit einem weichen Pinsel durchgeführt werden, besonders um Kratzer im kerbempfindlichen PC zu vermeiden. Aufliegender Schmutz und Staub sollte durch Absaugen oder Abkehren entfernt werden, um einem Befall durch Mikroorganismen vorzubeugen. Insbesondere PUR ist gegen einen Abbau durch Bakterien und Schimmelpilze anfällig. Der Kontakt des Polycarbonat-Gehäuses mit Aceton, Ketonen, aromatischen Kohlenwasserstoffen, Terpentin, Tetrachlorkohlenstoff und Wasser über 60 °C sollte vermieden werden, da die Gefahr der Spannungsrissbildung besteht. Auch auf Säuren, Alkalien, Oxidationsmittel oder heißes Wasser sollte verzichtet werden, da diese zum Abbau der Polyurethan-Gummierung führen.

Oosten (2002) schildert in einem Fallbeispiel, dass Spannungsrisse in PC-Scheiben, welche zur Rahmung von Drucken verwendet wurden, auftraten. Das Museum, in dem die Drucke zwei Jahre lang hingen, verfügte über keine Klimatisierung, sodass sich der Ausstellungsraum erhitze, sobald Sonnenlicht hineinfieI. Zwischen kalter Wand und der Rückseite des Rahmens bildeten sich Mikroklimata, mit deutlich kühleren Temperaturen als im Raum. Dadurch kam es zur Auskondensation von Wasser, welches in Kontakt mit den PC-Scheiben kam, woraufhin sich Spannungsrisse im PC bildeten.

Hinsichtlich der Lagerung und Ausstellung von Objekten aus Polycarbonat lässt sich ableiten, dass die Bildung von Mikroklimata verhindert werden sollte, um der Bildung von Spannungsrissen vorzubeugen. Dies kann durch ein möglichst konstantes Raumklima mit niedriger Luftfeuchtigkeit und Temperatur erreicht werden. Die Anwesenheit von Feuchtigkeit kann zudem einen fotooxidativen Abbau von PUR beschleunigen und sollte deshalb vermieden werden. Waentig (2004) empfiehlt eine relative Luftfeuchte zwischen 50 % und 55 %. Die Raumtemperatur sollte auf knapp unter 20 °C eingestellt werden. Sie sollte ebenso wie die relative Luftfeuchtigkeit keinen starken Schwankungen ausgesetzt sein. So kann u.a. die Wärmeausdehnung von Polycarbonat in Grenzen gehalten und weitere Rissbildung ausgeschlossen werden. Auch sollten die iBooks nur einer geringen Lichtmenge ausgesetzt werden. Waentig (2004) schlägt für Polycarbonat als auch für Polyurethan eine maximale Beleuchtung von 50 Lux vor. UV-Licht der Wellenlänge 285 - 411 nm sollte durch den Einsatz von entsprechenden Filtern eliminiert werden. Da die Degradation von PUR hauptsächlich über oxidative Reaktionen erfolgt, ist bei der Lagerung eine sauerstoffarme

Umgebung zu empfehlen. Für diesen Zweck bietet sich der Einsatz von Sauerstoff- und Schadstoffabsorbentien, wie Silica Gel oder Art Sorb, an.

Beim Handling während einer Ausstellung oder Lagerung der iBooks sollte auf übermäßiges Auf- und Zuklappen der Laptops verzichtet werden, um die Entstehung von zusätzlichen Spannungen im Gehäuse gering zu halten. Dadurch kann eine Vergrößerung der Risse an beiden Notebooks verhindert werden.

3.4.2 Netzteil

Für die Erhaltung von PVC spielt eine regelmässige Pflege eine entscheidende Rolle. Bei der Reinigung der Oberfläche sollten auf Lösemittel verzichtet werden, da die Beständigkeit von Weich-PVC gegenüber den gängigen Lösemitteln eingeschränkt ist (Kapitel 3.3.3.1). Darüber hinaus führt der Einfluss von Lösemitteln zu verstärkter Migration der Weichmacher (Kapitel 3.3.3.2). Der Kontakt von Weich-PVC mit Methanol, Ethanol und Ethylacetat kann ebenfalls zur Spannungsrisbildung führen. Als Alternative zur Reinigung mit Lösemitteln steht die mechanische Reinigung zur Verfügung, für die Shashoua (1999) ein möglichst weiches Material, als das zu reinigende PVC, empfiehlt. Dadurch wird die Bildung von Kratzern und Abrieb an der Oberfläche vermieden. Sollte doch mit Lösemitteln gereinigt werden, so schlägt Shashoua (1999) ein 2 %iges wässriges Detergenz vor. Wasser über 60 °C sollte nicht verwendet werden. Durch eine regelmässige Reinigung der Oberfläche kann verhindert werden, dass Schimmelbefall entsteht, welcher zum Abbau der Weichmacher und zur Verkürzung der Lebensdauer von Weich-PVC, führt.

Da die Hauptursache für die Alterung von Weich-PVC die Migration der Weichmacher ist, sollte das Ziel Präventiver Konservierung sein, ihren Verlust gering zu halten. Untersuchungen zu dem Einfluss verschiedener Umgebungsbedingungen auf die Migration des Weichmachers aus Weich-PVC und den damit verbundenen Alterungsprozess finden sich bei Shashoua (2003). Bei den Versuchen wurden Weich-PVC-Proben unterschiedlichen Raumklimata ausgesetzt und anschließend deren Weichmacher-Konzentrationen vorher und nachher verglichen. Shashoua (2003) leitet aus den Ergebnissen die Empfehlung ab, Weich-PVC separat in einem abgeschlossenen, inerten Behälter (beispielsweise einem Glasbehälter) aufzubewahren. Die Luft innerhalb des Behälters sollte nicht umgewälzt und auf Schadstoff-Absorber wie Aktivkohle oder Silica-Gel sollte verzichtet werden, da die Untersuchungen zu dem Ergebnis kamen, dass sie den Weichmacher-Verlust beschleunigten und damit die Alterung des Kunststoffes verstärkten. Die Anwesenheit von Absorbentien führte darüber hinaus zu dunklen Verfärbungen, besonders in den Bereichen des Weich-PVCs, die dem Absorber-Material am nächsten waren.

In einer weiteren Versuchsreihe befasste sich Shashoua (2008a) mit der Auswirkung unterschiedlicher Lagerungstemperaturen auf den Erhaltungszustand von Weich-PVC. Da Hydrolyse und Oxidation bei niedrigen Temperaturen verlangsamt ablaufen, stellt die Tiefkühlung für einige Kunststoffe wie Celluloseacetat ein bewährtes Mittel zur Erhaltung dar. Shashouas Untersuchungen machen allerdings deutlich, dass eine Tiefkühlung auf -20 °C für Weich-PVC ungeeignet ist. Lagerung bei diesen Temperaturen kann zu irreparablen

Schäden und dem Verlust des Objektes führen, da Weich-PVC aufgrund seines relativ hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten schrumpft. Die Schrumpfung des Materials aufgrund der niedrigen Temperaturen führt zu Spannungen innerhalb des Kunststoffes, was die Bruch- und Rissbildung begünstigt. Waentig (2004) schlägt für die optimale Lagerung von Weich-PVC eine staubfreie Umgebung vor, mit einer relativen Luftfeuchte bis 50 % und Temperaturen knapp unter 20 °C. Empfehlenswert sind Temperaturen zwischen 17 und 19 °C, da bei kühleren Temperaturen der Austritt der Weichmacher gehemmt wird. Eine relative Luftfeuchte von 50 % sollte deshalb nicht überschritten werden, da PVC dazu tendiert Wasser aus der Umgebungsluft zu absorbieren. Bei stark hydrophoben Weichmachern kann eine Reaktion mit Wasser zu verstärkter Migration führen (Shashoua, 2008b).

Weich-PVC sollte bei Ausstellung und Lagerung einer möglichst geringen Strahlungs-dosis ausgesetzt werden. Licht mit Wellenlängen von 300 nm bis 411 nm sollten vermieden werden. Fotooxidative Reaktionen unter Einwirkung von Licht und Ozon führen zu Verfärbungen und Abspaltung von Chlorwasserstoff und Weichmacherverlust, weshalb ihr Einfluss möglichst gering gehalten werden sollte. Wie schon bei Doležel (1978) beschrieben, zeigten auch die Untersuchungen von Shashoua (2003), dass ausmigrierter Weichmacher an der Oberfläche von Weich-PVC vor weiterer Vergilbung und somit vor weiterem fotochemischen Abbau schützen kann. Shashoua beobachtete, dass klebrige Oberflächen größere Konzentrationen an Weichmachern enthielten und sich wesentlich weniger verfärbten als nicht klebrige Oberflächen. Die schützende Wirkung blieb bei stark degradiertem Weich-PVC allerdings aus. Klebrige Schichten von migrierten Weichmachern bieten zudem den Nährboden für Mikroorganismen wie Schimmel. Das Entfernen von klebrigen Weichmacher-Filmen an der Oberfläche von Weich-PVC bleibt eine Fallentscheidung, die für jedes Objekt einzeln getroffen werden muss.

Das Weich-PVC-Kabel des iBooks 'Graphite' (Netzteil) sollte nicht in der originalen Kabelaufwicklung gelagert werden, damit die klebrigen Oberflächen nicht aneinander haften. Als Schutz- und Zwischenschicht kann eine inerte und nicht haftende (z.B. bestehend aus Silikon oder Teflon) Schicht verwendet werden. Die Kabeloberfläche sollte darüber hinaus nicht in Kontakt mit anderen Kunststoffen kommen, da sich die ausmigrierten Weichmacher schädlich auf sie auswirken können. Die Kabel sollten generell vor Wärme geschützt werden.

Kapitel 4

Zusammenfassung und Ausblick

4.1 Zusammenfassung

Für diese Arbeit wurden zwei Apple iBooks G3 hinsichtlich der für ihre Herstellung verwendeten Kunststoffe untersucht. Mit Hilfe der Ergebnisse aus den durchgeführten FT-IR-Analysen wurden Rückschlüsse auf mögliche Schadensursachen sowie Empfehlungen zur Lagerung und Konservierung der iBooks abgeleitet.

In Kapitel 2 wurde ein Überblick über die Produktentwicklung der Apple iBook-Serie gegeben. Als Steve Jobs 1997 zu Apple zurückkehrte erfolgte eine Reduzierung der bisherigen Produktstrategie in vier Teilbereiche. Das iBook G3 war das erste tragbare Gerät, das speziell für die Sparte Verbrauchermarkt geschaffen wurde. Die Literaturrecherchen ergaben, dass beim Entwurfsprozess und der Produktentwicklung des iBooks gestalterische Aspekte im Vordergrund standen und weniger auf Herstellungskosten oder ungünstige Materialeigenschaften während der Herstellung Rücksicht genommen wurde. Das iBook G3 ('Clamshell') war von 1999 bis 2006 in drei technischen Ausstattungen, welche jeweils in unterschiedlichen Farben erhältlich waren, auf dem Markt.

In Kapitel 3.1 wurde zunächst der Erhaltungszustand beider iBooks dokumentiert und verglichen. Der Vergleich deckte Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit des weißen Polycarbonat-Gehäuses zwischen iBook 'Tangerine' und 'Graphite' auf. So wurde das erste Modell der Serie (iBook 'Tangerine') mit einer rauen Polycarbonat-Oberfläche versehen, während das letzte Modell (iBook 'Graphite') eine glatte Polycarbonat-Oberfläche besitzt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nicht untersucht aus welchen Gründen dieser Wechsel stattfand, denkbar sind ästhetische oder herstellungsbedingte Gründe. Beide iBooks zeigten ähnliche Schäden, allerdings in unterschiedlichen Ausprägungen. Von besonderem Interesse waren die Rissbildungen entlang der Apple-Logos unterhalb der Displays sowie an beiden Henkeln, welche an iBook 'Graphite' allerdings schwächer ausgeprägt sind. Die blau-graue Gummierung der Deckel-Oberseite an iBook 'Graphite' ist vergilbt. Auch zeigt das Netzteil von iBook 'Graphite' eine auffällige Verformung innerhalb der Kabelummantelung.

Um die Schadensursachen zu ermitteln wurden mittels FT-IR-Spektroskopie Kunststoffanalysen durchgeführt (Kapitel 3.2). Die Auswertung ergab:

	Ergebnis
Weißes Kunststoffgehäuse	Bisphenol-A-Polycarbonat
Apple-Logos	Bisphenol-A-Polycarbonat
Tragegriff	Bisphenol-A-Polycarbonat (gefärbt)
Gummierung	Polyurethan-Ether (gefärbt)
Maustaste	Bisphenol-A-Polycarbonat (gefärbt)
Kabelummantelung (Netzteil)	Weich-PVC mit Phthalat-haltigem Weichmacher

Die Analyseergebnisse stimmten mit den Angaben aus der Literatur überein. Darauf aufbauend wurden die Materialeigenschaften von Polycarbonat, Polyurethan-Gummi und Weich-PVC hinsichtlich ihrer Alterung zusammengetragen.

Bei Polycarbonat lag der Fokus auf dem Spannungsrisssverhalten, da es im Fall der iBooks im weißen Polycarbonat-Gehäuse zu auffälliger Rissbildung entlang des Apple-Logos und am Tragegriff gekommen ist. In der Literatur wird auf die Anfälligkeit von Polycarbonat bei gleichzeitiger Einwirkung einer Kraft (von Außen einwirkend oder Eigenspannungen) und eines quellenden oder lösenden Mediums zur Spannungsrisssbildung hingewiesen. Rissbildung kann bei Polycarbonat aber auch ohne Einwirkung eines Mediums, nur durch mechanische Krafteinwirkung von Außen oder durch Eigenspannungen verursacht werden. Die einwirkenden Kräfte führen an Fehlstellen, Hohlräumen, scharfen Ecken und kleinen Löchern zu lokalen Spannungskonzentrationen, an denen sich bei anhaltender Krafteinwirkung Crazes und Risse bilden können.

Für die Entstehung der Risse unterhalb des Displays bedeutet dies, dass die Form sowie die Lage des Logos die Rissbildung begünstigten. Die Orientierung der Moleküle an der Grenzfläche zwischen Logo und umgebendem weißen Gehäuse sowie die Ecken und Rundungen des Apple-Logos führen zu lokalen Spannungskonzentrationen. Die beim Auf- und Zuklappen des Laptops auf das Gehäuse, insbesondere auf den verhältnismässig schmalen Bereich unterhalb des Displays, wirkenden Spannungen, können sich nicht hinreichend verteilen bzw. abbauen. Dies führte an den genannten Stellen zur Craze- und anschließender Rissbildung. Da im Gegensatz dazu an der Außenseite des Deckels eine Spannungsverteilung über eine größere Fläche hinweg möglich ist, sind entlang des dort befindlichen Logos keine Risse entstanden. Daraus lässt sich folgern, dass die Risse während des Gebrauchs entstanden, die Herstellung, das Design der Laptops sowie die Wahl des Kunststoffes ihre Entstehung aber begünstigten. Die Rissbildung ist somit keine Folge falscher Lagerungs- oder Ausstellungsbedingungen, sondern ist auf einen intensiveren Gebrauch des iBooks 'Tangerine' im Gegensatz zum iBook 'Graphite' zurückzuführen.

Bei der Alterung von Polyurethan-Gummi laufen hauptsächlich fotooxidative und hydrolytische Abbauprozesse ab. Die Anfälligkeit gegenüber UV-Strahlung der Wellenlängen 334 nm - 411 nm hat beim iBook 'Graphite' zur Vergilbung geführt, sodass es zu einer grünlichen Färbung des ursprünglich blau-grauen Kunststoffes an der Oberseite des Deckels kam. Obwohl mit bloßem Auge keine Farbveränderungen zwischen Ober- und Unterseite am

iBook ‘Tangerine’ erkennbar sind, konnten die FT-IR-Analysen einen bereits fortgeschrittenen fotooxidativen Abbau der Gummierung nachweisen. Die Chemikalienbeständigkeit und Beständigkeit gegen mikrobiellen Abbau von PUR sind ebenfalls eingeschränkt.

Hauptschadensursache bei der Alterung von Weich-PVC ist das Ausdünsten von Weichmachern an die Oberfläche des Kunststoffes. Dabei können Zersetzungsprodukte migrieren und sich als klebriger Film ablagern. Ursachen für die Migration des Weichmachers können u.a. das Einwirken von Lösemitteln, erhöhte Temperaturen und Sonneneinstrahlung sein. Darüber hinaus haben die Qualität und Menge des verwendeten Weichmachers Einfluss auf die Alterung von Weich-PVC. Bei dem klebrigen Film an der Oberfläche der Netzteilkabel handelt es sich dementsprechend um austretenden Weichmacher. Die Verformung und die fortgeschrittenere Alterung (stärkere Vergilbung, klebriger Oberfläche) an der Kabelummantelung von iBook ‘Graphite’ gegenüber iBook ‘Tangerine’ könnte die Ursache einer erhöhten Wärmeeinwirkung während des Gebrauchs sein. Eine erhöhte Temperatur führt gleichzeitig zu einer erhöhten Ausdünstungsrate des Weichmachers, was die Alterung zusätzlich verstärkt haben könnte.

Nach Berücksichtigung aller ermittelten Schadensursachen und Materialeigenschaften wurden in Kapitel 3.4 Empfehlungen zur Lagerung und Konservierung beider iBooks ausgearbeitet. Generell ist eine intensive Pflege bei der Erhaltung der Geräte unerlässlich. Dazu zählt regelmäßige Reinigung während Ausstellung oder Lagerung, ebenso wie eine regelmäßige Kontrolle hinsichtlich Materialveränderungen. Die iBooks sollten, aufgrund der Empfindlichkeit gegenüber Lösemitteln von Polycarbonat (Spannungsrisbildung) und PUR, nach Möglichkeit trocken gereinigt werden. Die Raumtemperatur sollte bei Lagerung und Ausstellung knapp unter 20 °C liegen, eine maximale Beleuchtung mit 50 Lux sollte nicht überschritten werden. UV-Strahlung der Wellenlänge 285 - 411 nm sollte durch den Einsatz von entsprechenden Filtern minimiert werden. Die relative Luftfeuchte sollte, wie bei Waentig (2004) empfohlen, zwischen 50 % und 55 % eingestellt sein.

Die Netzteile sollten separat in einem Behälter aus inertem Material (z.B. Glascontainer) aufbewahrt werden. Wichtig ist der Verzicht auf Luftumwälzung innerhalb des Behälters und das Weglassen von Schadstoffabsorbentien, da diese den Weichmacherverlust von Weich-PVC fördern. Die Temperaturen sollten nach Waentig (2004) zwischen 17 und 19 °C liegen, da bei kühleren Temperaturen der Austritt der Weichmacher gehemmt wird. Desweiteren empfiehlt Waentig (2004) eine relative Luftfeuchte von 50 % nicht zu übersteigen. Das Weich-PVC-Kabel von iBook ‘Graphite’ (Netzteil) sollte nicht in der originalen Kabelaufwicklung gelagert werden, damit die klebrigen Oberflächen nicht aneinander haften. Als Schutz- und Zwischenschicht kann eine inerte und nicht haftende (z.B. mit Silikon oder Teflon beschichtete) Schicht verwendet werden.

4.2 Ausblick

Während der Untersuchungen zu den Kunststoffen wurde der Einfluss der Pigmente auf die mechanischen Eigenschaften nicht berücksichtigt, obwohl er ein wesentlicher Aspekt

bei der Herstellung und Alterung der Kunststoffe sein kann. Es wäre von weiterführendem Interesse, die für die Färbung des Polyurethans und des Polycarbonats verwendeten Farbstoffe zu analysieren. Mit dem daraus gewonnenen Wissen könnten Rückschlüsse auf ihre Alterung (beispielsweise Lichtempfindlichkeit und Wärmebeständigkeit) gezogen werden, aus denen wiederum konkrete Lagerungs- und Ausstellungsbedingungen abgeleitet werden können. Sind die Pigmente oder Farbstoffe bekannt, so könnte die Ursache für die kreisförmige Farbveränderung am Akkufach von iBook 'Tangerine' geklärt werden, da in dieser Arbeit nicht tiefer auf diese Fragestellung eingegangen werden konnte.

An der Cultural Heritage Agency of the Netherlands (RCE) in Amsterdam wurden durch das Forschungsteam um Suzan de Groot in mehreren Forschungsarbeiten systematische Pigmentanalysen an Objekten aus Kunststoff durchgeführt. Erste Ergebnisse, zu den am häufigsten in Objekten aus Kunststoff vorgefundenen roten synthetischen Farbstoffen, wurden 2013 auf der Future Talks 013 Konferenz vorgestellt. Die darauf aufbauenden Ergebnisse zu den orangen und gelben Farbstoffen sollen im Oktober 2015 auf den Future Talks 015 präsentiert werden. Die laufenden Projekte machen die Aktualität des Themas deutlich und veranschaulichen gleichzeitig die Wissenslücke, die in diesem Forschungsbereich der modernen Materialien noch besteht.

Da das technische Innenleben der iBooks bewusst nicht Bestandteil dieser Arbeit war, wäre es eine sinnvolle Ergänzung, vergleichbare Untersuchungen zu den Materialien, im Inneren der Laptops durchzuführen. Erste Ansatzpunkte wurden in Form von Proben bereits am Deutschen Museum geschaffen. Durch eine Analyse aller verwendeten Materialien, könnten vollständigere Empfehlungen zur Lagerung und Konservierung erstellt werden.

Literatur

- Akhurst, S. (2008). Design and sustainability. In **Plastics: looking at the future and learning from the past ; papers from the conference held at the Victoria and Albert Museum, London, 23 - 25 May 2007** (S. 160–162). Archetype Publications.
- Berlich, R. (2005). **Alterung und Rissbildung unter Medieneinfluss bei Polycarbonat =: Aging and crack initiation under the influence of liquid medium at polycarbonat** (1. Aufl.) (Nr. 163). Mainz.
- Bonten, C. (2014). **Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen**. Hanser.
- Brehm, I. (2004). **IR-Spektroskopie** [RÖMPP-Enzyklopädie]. Georg Thieme Verlag KG. Zugriff am 2015-07-03 auf <https://roempp.thieme.de>
- Brüggemann, O. & Beutner, K. (2009). **Polyvinylchloride** [RÖMPP-Enzyklopädie]. Georg Thieme Verlag KG. Zugriff am 2015-07-26 auf <https://roempp.thieme.de>
- Carter, J. (2013). **Starring the Computer - Apple Clamshell iBook G3** [Website]. Zugriff am 2015-06-02 auf <http://www.starringthecomputer.com/computer.html?c=69>
- Caseri, W. & Beutner, K. (2009). **Polycarbonate** [RÖMPP-Enzyklopädie]. Georg Thieme Verlag KG. Zugriff am 2015-06-05 auf <https://roempp.thieme.de>
- Dannoux, A., Esnouf, S., Begue, J., Amekraz, B. & Moulin, C. (2005). Degradation kinetics of poly(ether-urethane) Estane induced by electron irradiation. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research** (236), 488–494.
- Doležel, B. (1978). **Die Beständigkeit von Kunststoffen und Gummi** (1. Aufl.; C.-M. v. Meysenbug, Hrsg.). Hanser.
- Domininghaus, H. (2005). **Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften** (6., neu bearb. und erw. Aufl.; P. Eyerer, Hrsg.). Springer.
- DuPont. (2015). **Surlyn properties overview** [Datenblatt]. Zugriff am 2015-07-05 auf http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/packaging-materials-and-solutions/packaging-materials-and-solutions-landing/documents/surlyn_properties_overview_.pdf
- Erdmann, C. (2011). **“One more thing”: Apples Erfolgsgeschichte vom Apple I bis zum iPad**. Addison-Wesley.
- Gómez-Sánchez, E., Kunz, S., Simon, S., Koch, L.-C., Wiedman, A., Weber, T. & Mengel, M. (2012). ATR/FT-IR spectroscopy for the characterisation of magnetic tape materials. **Spectroscopy Europe**, **24** (1), 6. Zugriff am 2015-07-06 auf <http://www.morana-rtd.com/e-preservation-science/2011/GomezSanchez-13-06-2010.pdf>
- Groot, S. d., Laganá, A., Oosten, T. v., Keulen, H. v. & Palmeira, M. (2013). The wear and tear of polyurethane elastomers. Investigation into properties, degradation and treatments. In **Future talks 011: technology and conservation of modern materials in design; October 26/28 2011, Die Neue Sammlung, The International Design Museum Munich** (S. 88-96). Die Neue Sammlung.
- Hellstern, U. (1994). **FTIR-ATR-Spektroskopie als Methode zur Charakterisierung dünner Polymerschichten und zur Untersuchung ihrer Permeabilität**. Dissertation, Eberhard-Karls-Universität Tübingen.

- Kahney, L. (2014). **Jony Ive: Das Apple-Design-Genie**. Plassen Verlag ein Imprint der Börsenmedien AG.
- Kerr, N. & Batcheller, J. (1993). Degradation of polyurethanes in 20th-century museum textiles. In **Saving the 20th Century, the Conservation of Modern Materials: Proceedings of a Conference Symposium '91, Saving the Twentieth Century, Ottawa, Canada, 15 to 20 September, 1991** (S. 189–206).
- Macworld NY 1999-the first iBook introduction [Youtube-Video]. (1999). Zugriff auf <https://www.youtube.com/watch?v=cdpRSj7tLiY>
- McCarthy, S. J., Meijs, G. F., Mitchell, N., Gunatillake, P. A., Heath, G., Brandwood, A. & Schindhelm, K. (1997, 11). In-vivo degradation of polyurethanes: transmission-FTIR microscopic characterization of polyurethanes sectioned by cryomicrotomy. **Biomaterials**, **18** (21), 1387–1409.
- Mitchell, G., France, F., Nordon, A., Tang, P. L. & Gibson, L. T. (2013). Assessment of historical polymers using attenuated total reflectance-Fourier transform infra-red spectroscopy with principal component analysis. **Heritage Science**, **1** (1), 28. Zugriff am 2015-07-27 auf <http://www.heritagesciencejournal.com/content/1/1/28/abstract>
- Oosten, T. v. (2002). Crystals and Crazes: Degradation in plastics due to microclimates. In **Plastics in art history, technology, preservation** (S. 80–89). Siegl.
- Oosten, T. v., Lorne, A. & Béringuer, O. (2011). **PUR facts: conservation of polyurethane foam in art and design**. Amsterdam Univ. Press.
- Perkin-Elmer. (o.J.). **FTIR Spectroscopy: Attenuated Total Reflectance (ATR)**. Zugriff auf http://shop.perkinelmer.com/content/TechnicalInfo/TCH_FTIRATR.pdf
- Quye, A. & Williamson, C. (Hrsg.). (1999). **Plastics: collecting and conserving**. NMS.
- Rogalla, D. G. (1982). **Ein Beitrag zur Erklärung der "Spannungsrißbildung" bei Kunststoffen**. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- Sá, S. F. d., Ramos, A. M., Macedoa, R., Ferreira, J. L., Lisboa, H. & Borges, J. P. (2013). The behaviour of flexible polyurethane foam in a contemporary sculpture: Viuva Negra by Joao Vieira, 1981. In **Future talks 011: technology and conservation of modern materials in design ; October 26/28 2011, Die Neue Sammlung, The International Design Museum Munich** (S. 233–239). Die Neue Sammlung.
- Sale, D. (1988). The effect on solvents on four plastics found in museum collections: a treatment dilemma. (preprints). **Scottish Society for Conservation and Restoration: Modern Organic Materials**, 105–110.
- Schnell, H. (1967). Über Polycarbonate. **Die Naturwissenschaften**, **54** (12), 306–313.
- Schulze, S. & Grätz, I. (Hrsg.). (2011). **Apple design: [...anlässlich der Ausstellung "Stylelectrical. Von Elektrodesign, das Geschichte Schreibt" im Museum für Kunst und Gewerbe Hamburg, 26. August 2011 - 15. Januar 2012]**. Hatje Cantz.
- Shashoua, Y. (1999). Back to plastics. In **Reversibility: does it exist?** British Museum.
- Shashoua, Y. (2003). Effect of indoor climate on the rate and degradation mechanism of plasticized poly (vinyl chloride). **Polymer Degradation and Stability**, **81** (1), 29–36. Zugriff am 2015-07-27 auf <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391003000594>

- Shashoua, Y. (2008a). Conservation of plastics: is it possible today? In **Plastics: looking at the future and learning from the past ; papers from the conference held at the Victoria and Albert Museum, London, 23 - 25 May 2007** (S. 12–19). Archetype Publications.
- Shashoua, Y. (2008b). **Conservation of Plastics: Materials Science, Degradation and Preservation**. Elsevier/Butterworth-Heinemann.
- Uhlig, K. (2001). **Polyurethan-Taschenbuch** (2., durchges. und erw. Aufl.). Hanser.
- Waentig, F. (2004). **Kunststoffe in der Kunst: eine Studie unter konservatorischen Gesichtspunkten**. Imhof.
- Wings, N. (1992). **Differentialkalorimetrische und röntgenographische Untersuchungen an binären Systemen aus Poly(butylenterephthalat) und Bisphenol-A-Polycarbonat**. Dissertation, Universität Köln.

Danksagung

Ich danke Professor Erwin Emmerling sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft an der Technischen Universität München für die Ermöglichung dieser Arbeit.

Mein herzlicher Dank gilt meiner Betreuerin Dr. Marisa Pamplona Bartsch für die hilfreichen Anregungen während der letzten drei Monate und die Unterstützung zum analytischen Teil dieser Arbeit. Besonders möchte ich mich bei Dipl. Rest. Univ. Tim Bechthold für die Projektvermittlung, Mithilfe bei der Themenfindung sowie der Bereitstellung von Objekt und Arbeitsplatz bedanken. Des Weiteren bedanke ich mich bei Dipl. Rest. Univ. Simon Kunz für den stetigen fachlichen Austausch und die positive Kritik. Bei Dr. Paola Bruno bedanke ich mich vielmals für die fachlichen Einschätzungen zum Thema Spannungsrissbildung.

Anhang A

Fotodokumentation

A.1 iBook 'Tangerine'



Abbildung A.1: Gesamtaufnahme, Oberseite.



Abbildung A.2: Gesamtaufnahme, Unterseite.



Abbildung A.3: Gesamtaufnahme, Oberseite.

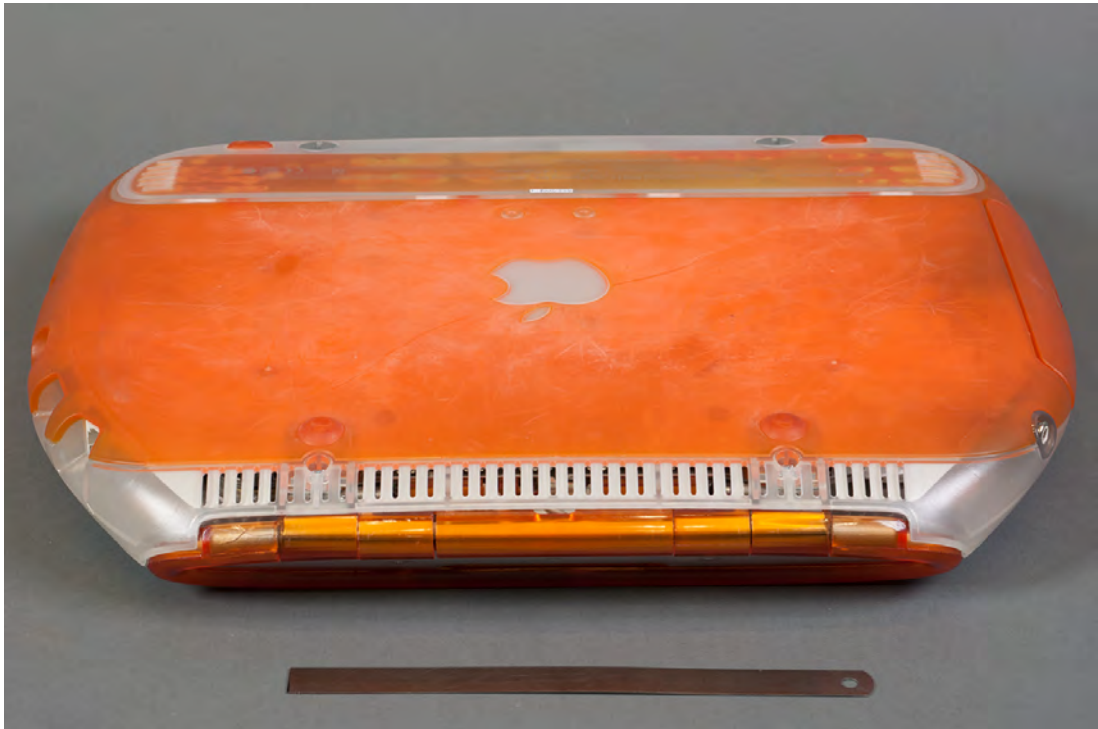


Abbildung A.4: Gesamtaufnahme, Unterseite.



Abbildung A.5: Innenseite im aufgeklappten Zustand.



Abbildung A.6: Außenseite im aufgeklappten Zustand.



Abbildung A.7: Seitenansicht, Unterseite.



Abbildung A.8: Seitenansicht, Unterseite.



Abbildung A.9: Spannungsriss unterhalb des Displays.



Abbildung A.10: Risse am Power-Knopf.



Abbildung A.11: Risse im Tragegriff nahe des Scharniers.



Abbildung A.12: Risse am CD-Laufwerk.

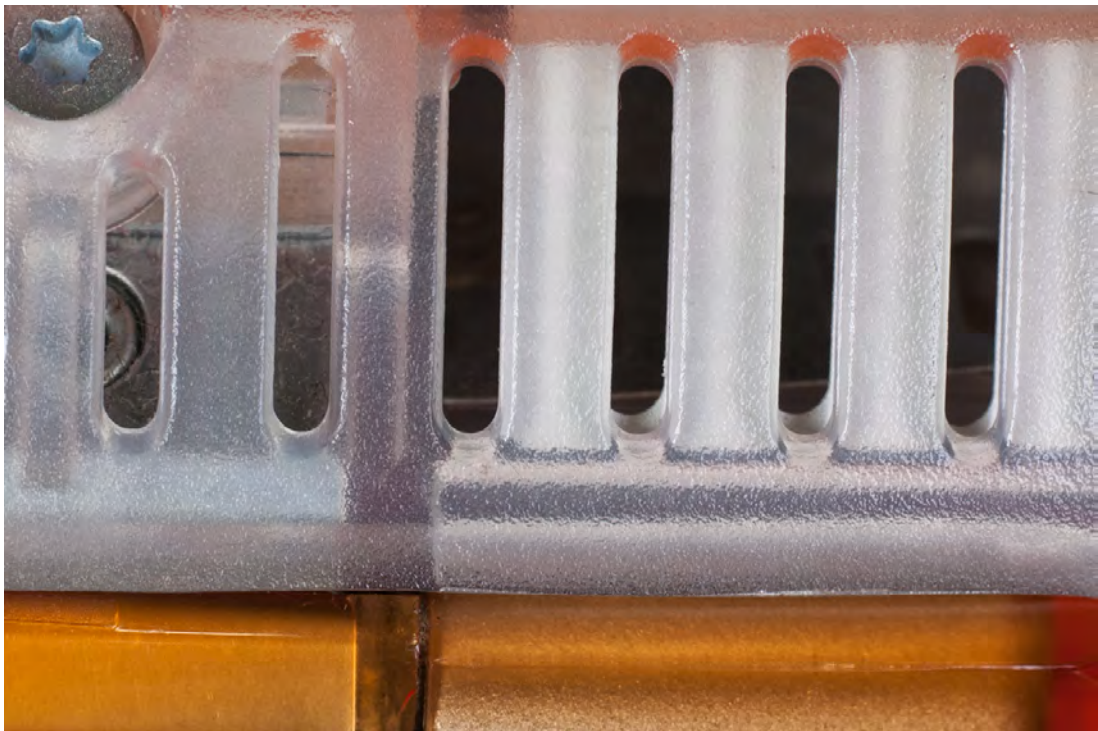


Abbildung A.13: Raue Oberflächengestaltung des weißen Kunststoffs.



Abbildung A.14: Farbveränderungen am Akkufach nahe der Lüftungsschlitze.



Abbildung A.15: Kratzer und Abrieb an der Unterseite.

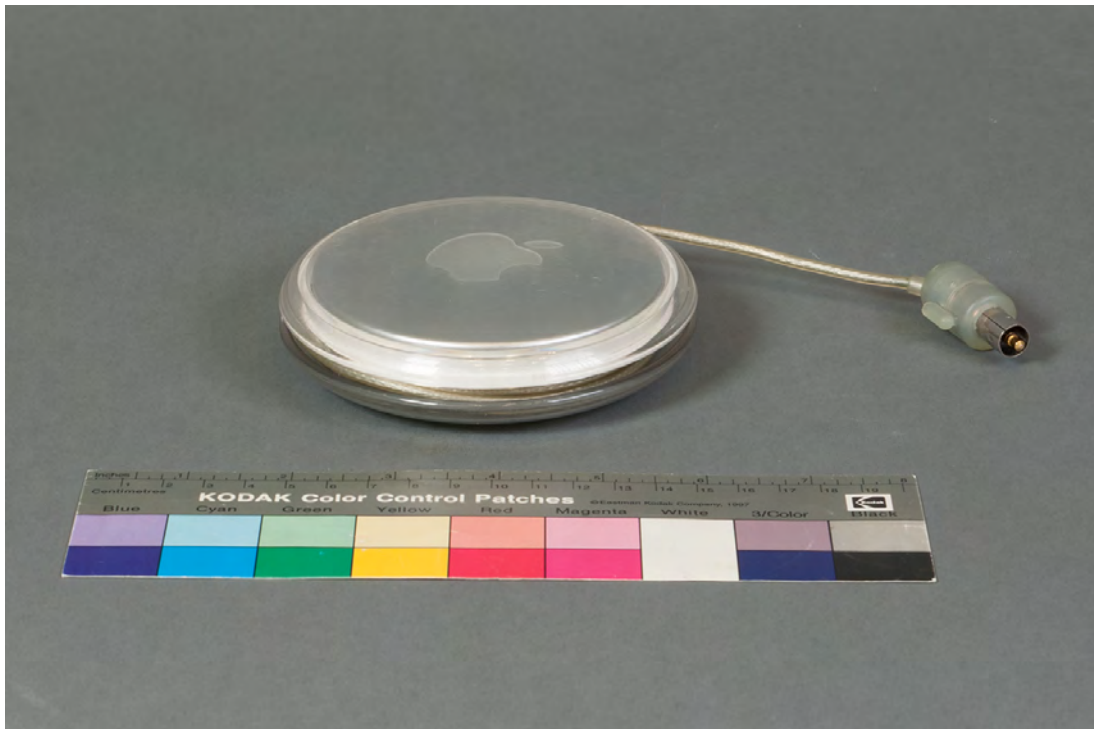


Abbildung A.16: Gesamtaufnahme Netzteil.



Abbildung A.17: Gesamtaufnahme Netzteilunterseite.



Abbildung A.18: Steckerende des Netzteils.

A.2 iBook 'Graphite'



Abbildung A.19: Gesamtaufnahme, Oberseite.



Abbildung A.20: Gesamtaufnahme, Unterseite.



Abbildung A.21: Gesamtaufnahme, Oberseite.



Abbildung A.22: Gesamtaufnahme, Unterseite.



Abbildung A.23: Innenseite im aufgeklappten Zustand.



Abbildung A.24: Seitenansicht, Unterseite.



Abbildung A.25: Seitenansicht, Unterseite.



Abbildung A.26: Spannungsrisse am Logo unterhalb des Displays.



Abbildung A.27: Risse im Tragegriff nahe des Scharniers.

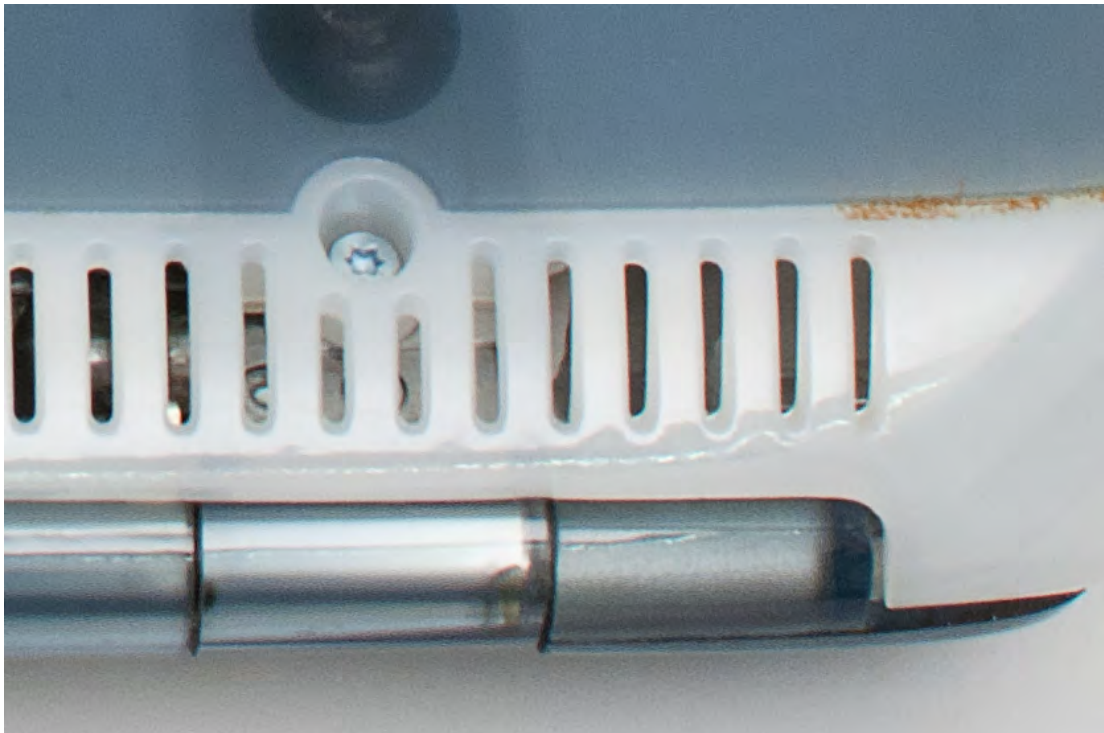


Abbildung A.28: Glatte Oberflächengestaltung des weißen Kunststoffs.



Abbildung A.29: Fehlstelle im Logo an der Oberseite des Deckels.



Abbildung A.30: Schmutzansammlung innerhalb der Fugen an der Unterseite.

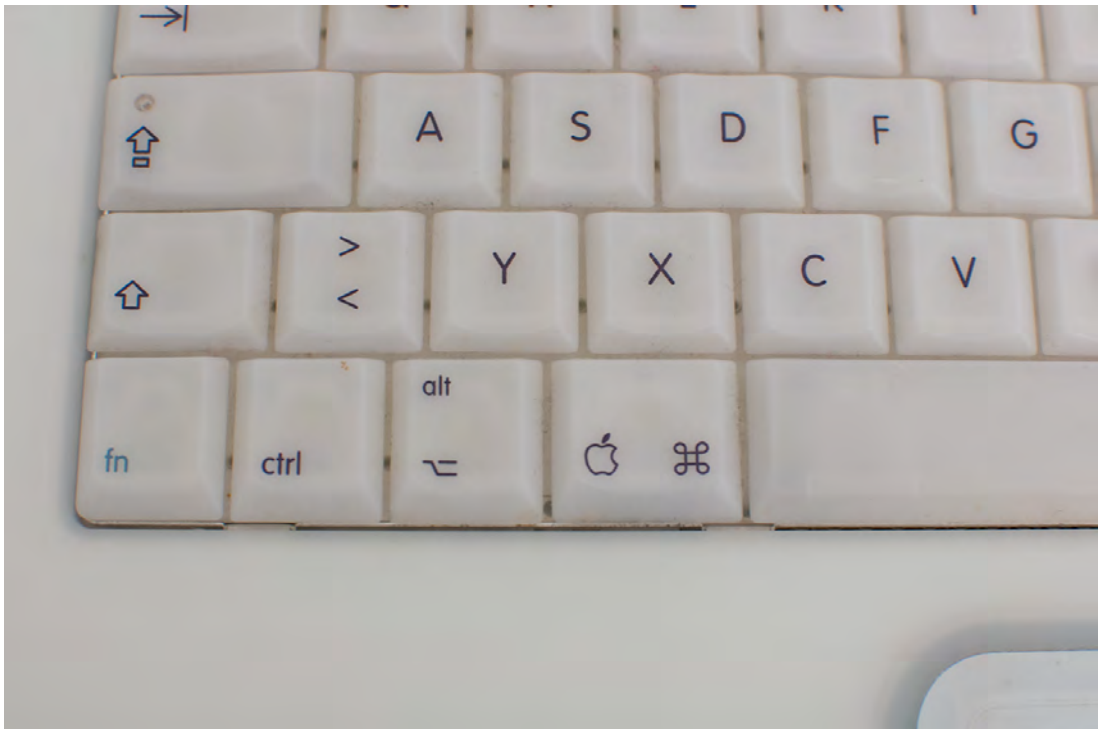


Abbildung A.31: Staub und Schmutz in der Tastatur.



Abbildung A.32: Detailaufnahme des Akkufachs.



Abbildung A.33: Netzteil, Oberseite (©Deutsches Museum)



Abbildung A.34: Netzteil, Unterseite (©Deutsches Museum)



Abbildung A.35: Strukturveränderung an der Kabelummantelung des Netzteils.

Anhang B

Analyseberichte

Probenentnahme durch Objekt- und Restaurierungsforschung am Deutschen Museum

Objekt: Apple iBook G3 in „Tangerine“ aus
Der Neuen Sammlung - The International
Design Museum Munich

Inv. Nummer: 852/2008-1 (Notebook)
727/2004-2 (Netzteil)

Fragestellung: Aus welchen Materialien
bestehen die Hauptkomponenten des
Gehäuses und des Netzteils?

Analysegerät: Alpha Infrarotspektrometer
Nr. Scans: 64, **Auflösung:** 4 cm⁻¹
Methode: Diamant ATR Einheit

Probe 1: Rückseite, CD Laufwerk, orange, weich

Probe 2: linkes Loch im Tragegriff, orange, hart, spröde

Probe 3: Rückseite, Loch für linke Schraube, weiß, hart

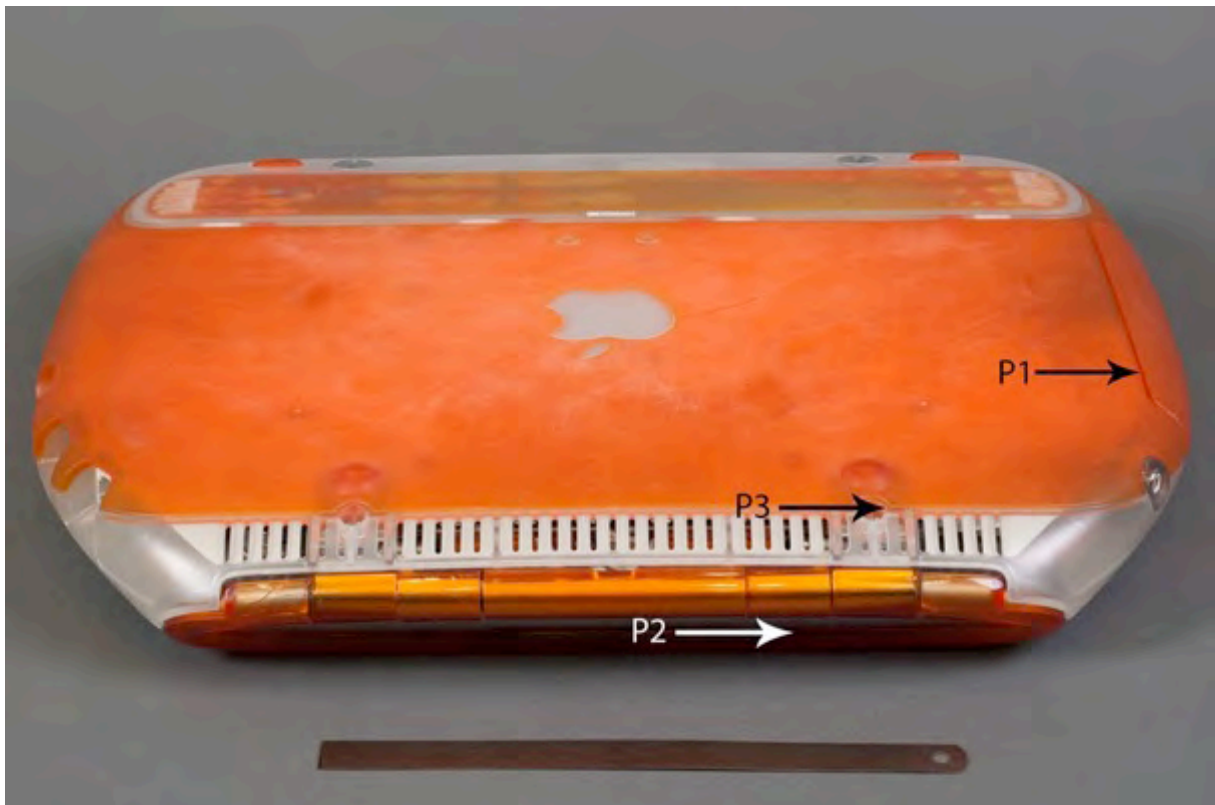
Probe 1 (Netzteil): Kabelummantelung, transparent,
weich

Probenentnahme: 15.06.20015 Janine Köppen

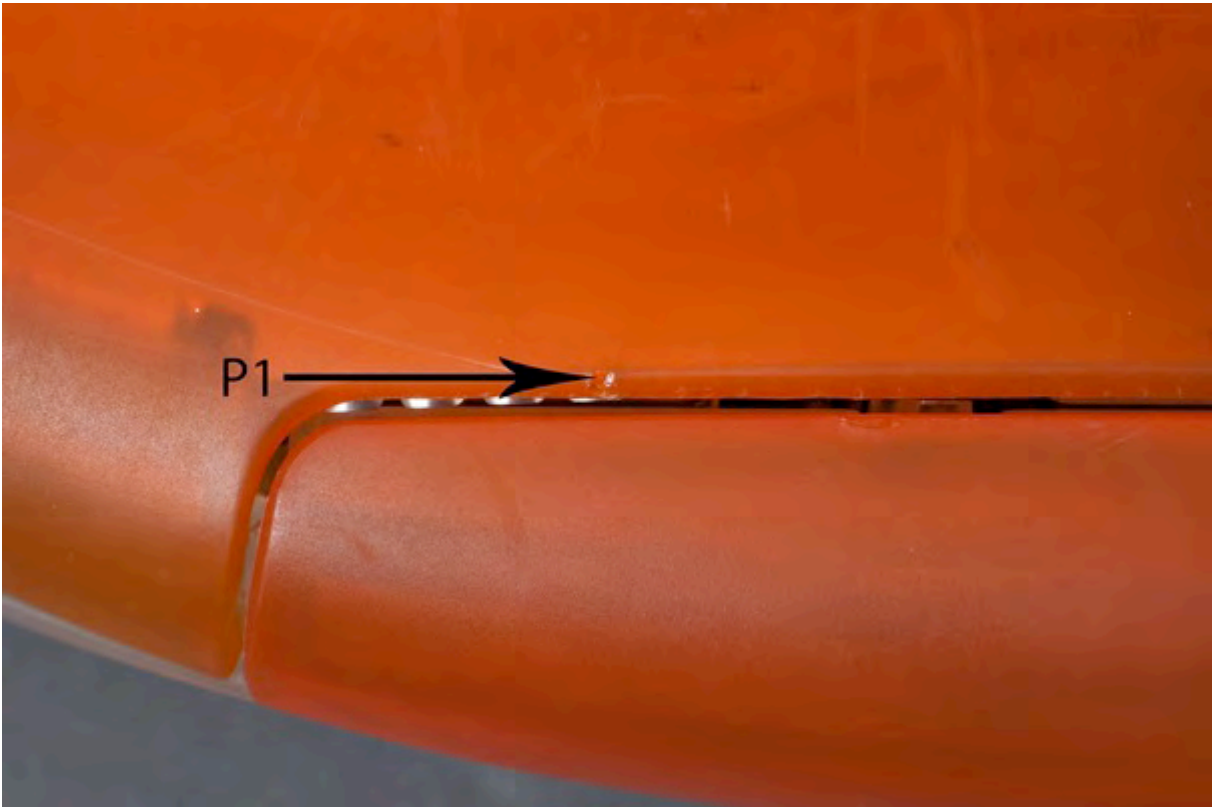
Bilder: Janine Köppen und Simon Kunz

Analyse: 03.07.20015 Marisa Pamplona, Janine
Köppen

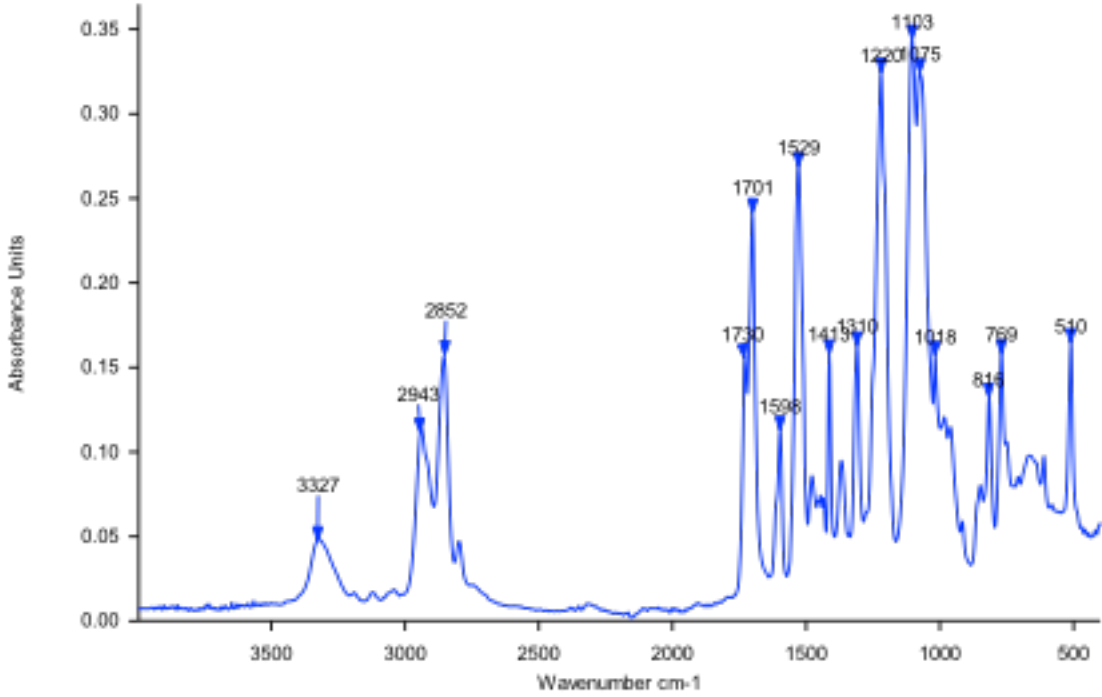
Übersicht der Proben 1-3



Probennameort der Probe 1



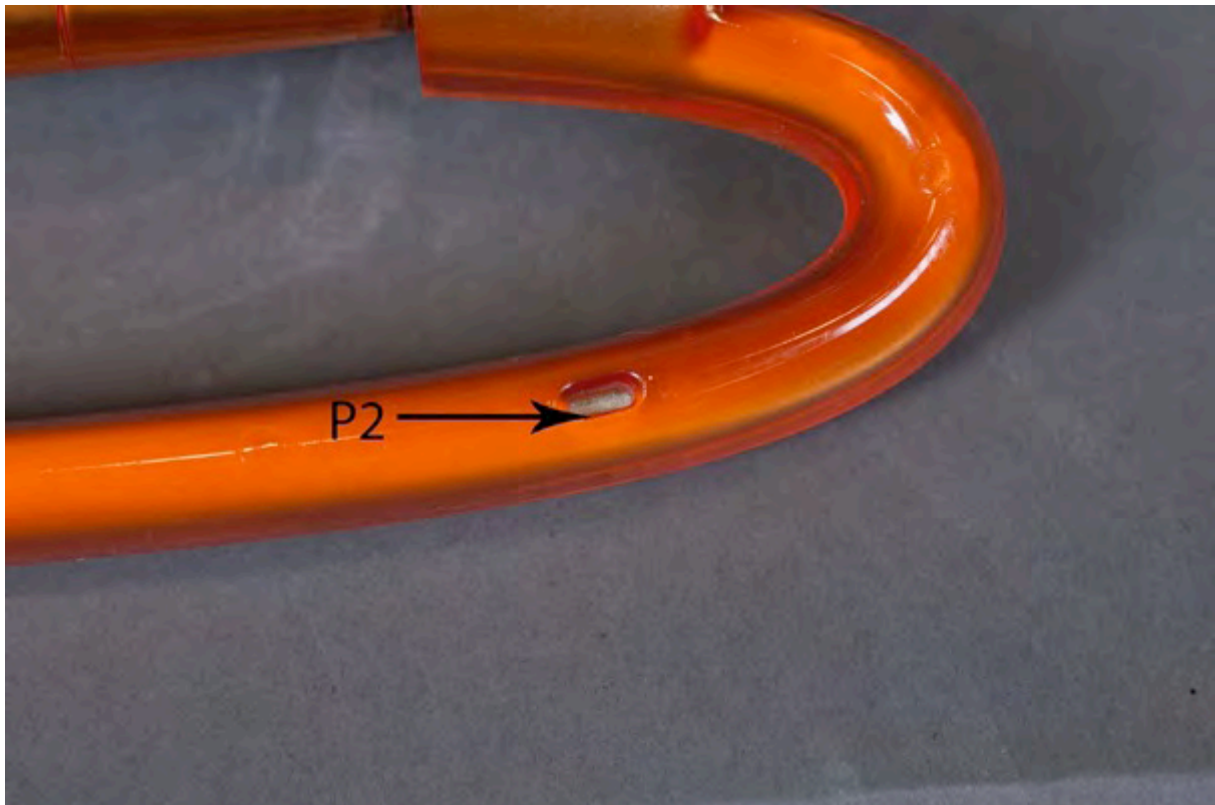
Ergebnis der Probe 1



Das FT-IR-Spektrum der orangenen Gummierung am Gehäuse (Probe 1) stimmt sehr gut mit dem Spektrum von Polyurethan (Datenbank HR Hummel Polymer and Additives) überein.

Das FT-IR-Spektrum von Probe 1 hat Absorptionsbanden bei 2852 cm^{-1} (CH_2 Streckschwingung), 1730 cm^{-1} und 1701 cm^{-1} (freie und hydrogen gebundene $\text{C}=\text{O}$ Streckschwingung), 1598 cm^{-1} (NH Deformationsschwingung¹ oder Ar C-C Streckschwingung²), 1529 cm^{-1} (C-N Streckschwingung, N-H Deformationsschwingung), 1413 cm^{-1} (C-C Streckschwingung, aromatischer Ring), 1310 cm^{-1} [C-N (C(COO)-NH)], 1220 cm^{-1} (C-N Streckschwingung), 1103 cm^{-1} (C-O-C asymmetrische Streckschwingung, Polyether), 1075 cm^{-1} (C-O-C asymmetrische Streckschwingung Polyurethane, charakteristische Bande für PUR-ether) 1018 cm^{-1} (aromatischer Ring), 816 cm^{-1} und 769 cm^{-1} (CH Deformationsschwingung, aromatischer Ring), welche typisch für Polyurethan-Ether mit aromatischen Gruppen sind³.

Probennameort der Probe 2

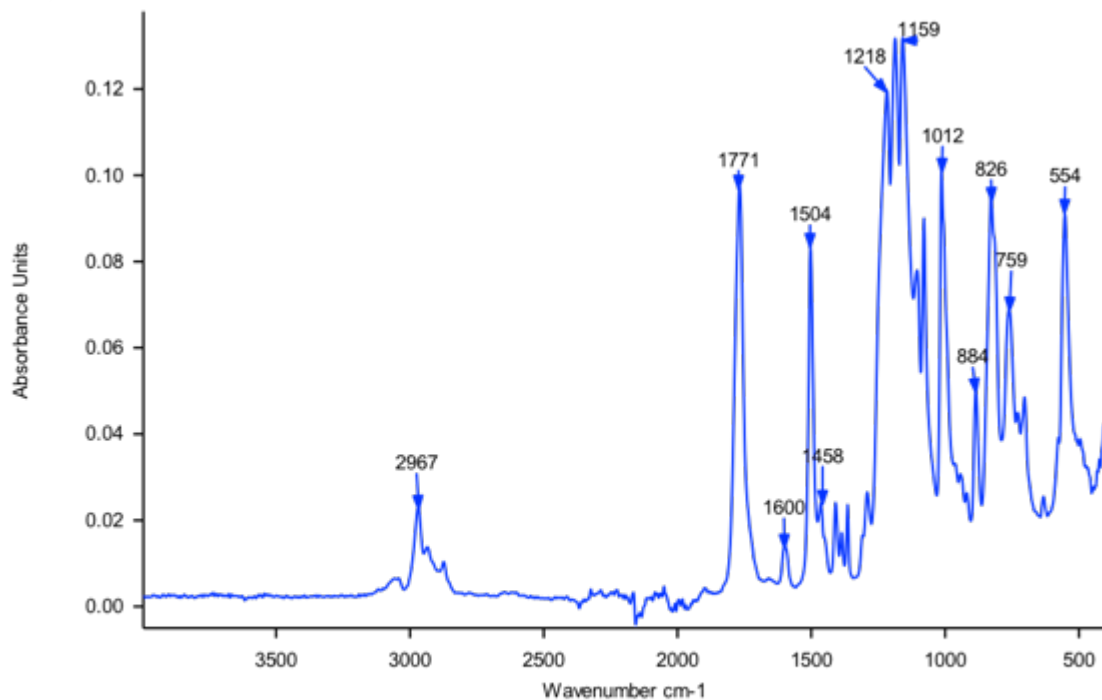


¹ S. J. McCarthy et al.: In-vivo degradation of polyurethanes: transmission-FTIR microscopic characterization of polyurethanes sectioned by cryomicrotomy, in *Biomaterials* 18, 1997.

² A. Dannoux et al.: *Degradation kinetics of poly(ether-urethane) Estane induced by electron irradiation*, in *Nucl. Instr. and Meth.* 236, 2005.

³ E. Gomez-Sánchez et.al.: *ATR-FTIR Spectroscopy for characterisation of magnetic tape materials*, 2012.

Ergebnis der Probe 2



Das FT-IR-Spektrum der orangenen Kunststoffummantelung am Tragegriff (Probe 2) stimmt gut mit dem Spektrum von Polycarbonat (Datenbanken SAMCO EU-Projekt POPART und Sprouse Scientific Systems ATR) überein.

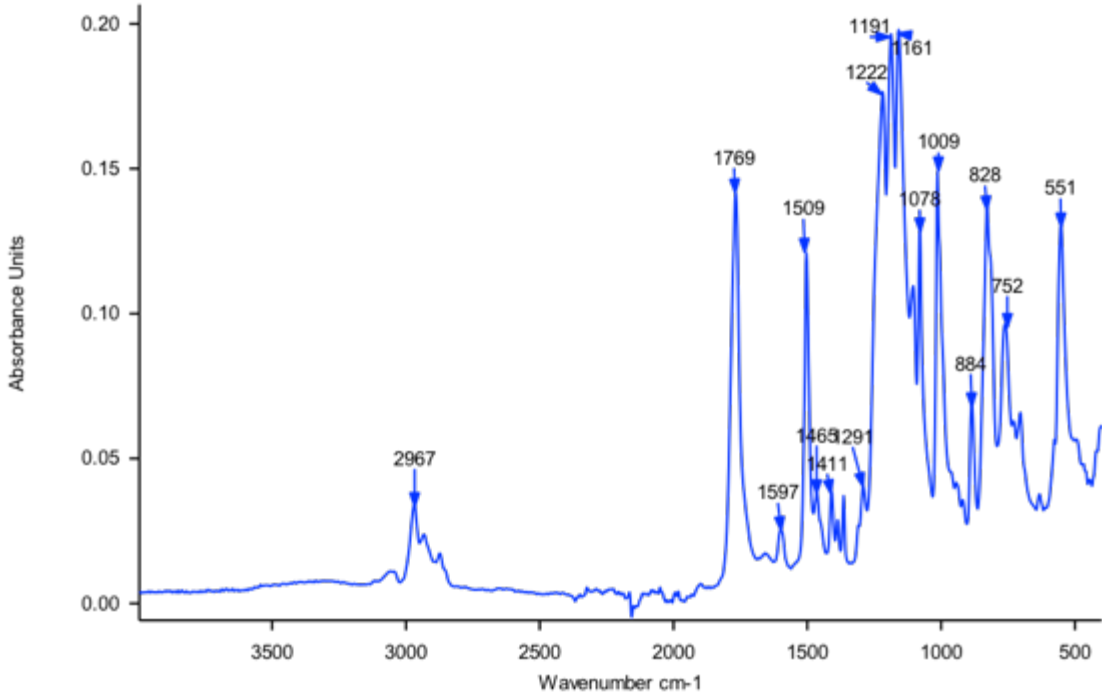
Das FT-IR-Spektrum von Probe 2 hat Absorptionsbanden bei 2967 cm^{-1} (CH_3 asymmetrische und symmetrische Streckschwingung), 1771 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ Streckschwingung), 1504 cm^{-1} (Benzolring Streckschwingung), 1218 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$ asymmetrische Streckschwingung), 1159 cm^{-1} ($=\text{CH}$ in-plane Deformationsschwingung), 1012 cm^{-1} (in-plane Deformationsschwingung), 826 cm^{-1} ($=\text{CH}$ out-of-plane Deformationsschwingung), welche typisch für Polycarbonat sind ⁴.

⁴ Nach Y. Shashoua: *Conseravtion of plastics*, 2008.

Probennameort der Probe 3



Ergebnis der Probe 3



Das FT-IR-Spektrum des weißen Kunststoffgehäuses (Probe 3) stimmt gut mit dem Spektrum von Polycarbonat (Datenbanken SAMCO EU-Projekt POPART und Sprouse Scientific Systems ATR) überein.

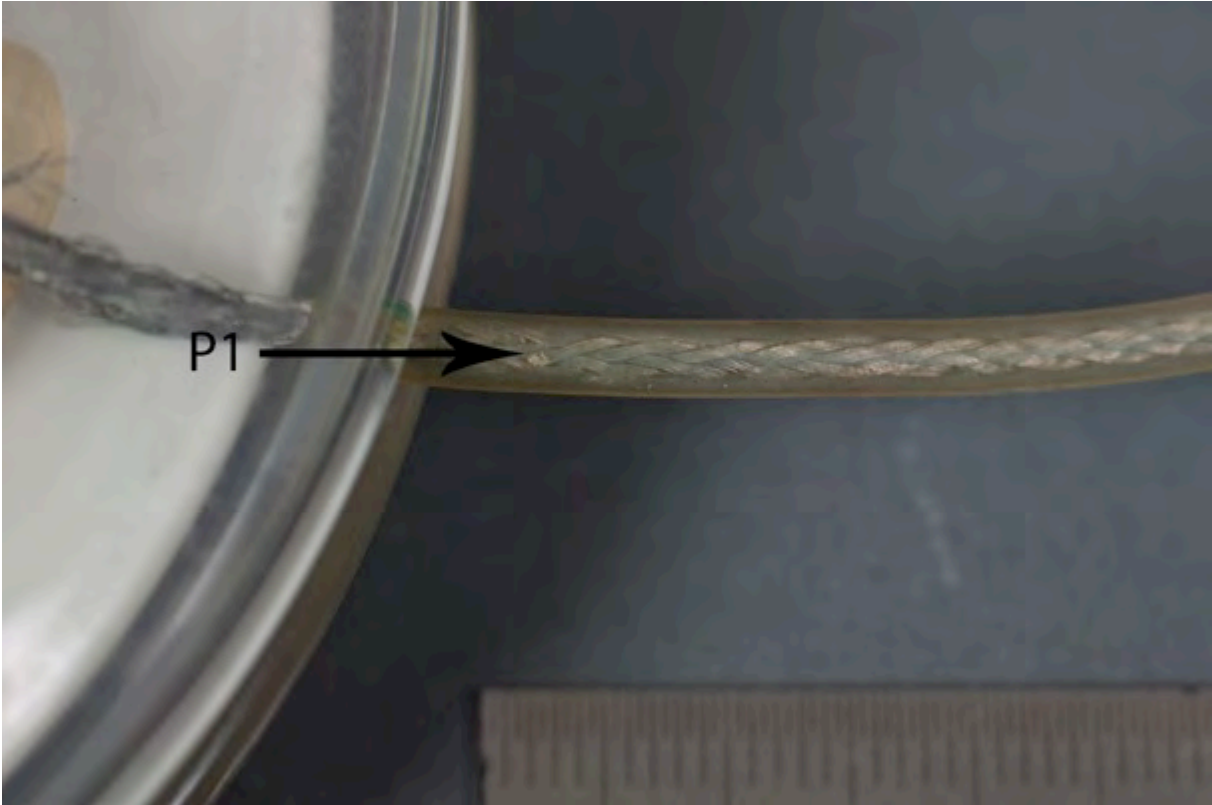
Das FT-IR-Spektrum hat Absorptionsbanden bei 2967 cm^{-1} (CH_3 asymmetrische und symmetrische Streckschwingung), 1769 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ Streckschwingung), 1509 cm^{-1} (Benzolring Streckschwingung), 1222 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$ asymmetrische Streckschwingung), 1191 cm^{-1} ($=\text{CH}$ in-plane Deformationsschwingung), 1161 cm^{-1} ($=\text{CH}$ in-plane Deformationsschwingung), 1009 cm^{-1} ($=\text{CH}$ in-plane Deformationsschwingung), 828 cm^{-1} ($=\text{CH}$ out-of-plane Deformationsschwingung), welche typisch für Polycarbonat sind ⁵.

Übersicht Probe 1 (Netzteil)

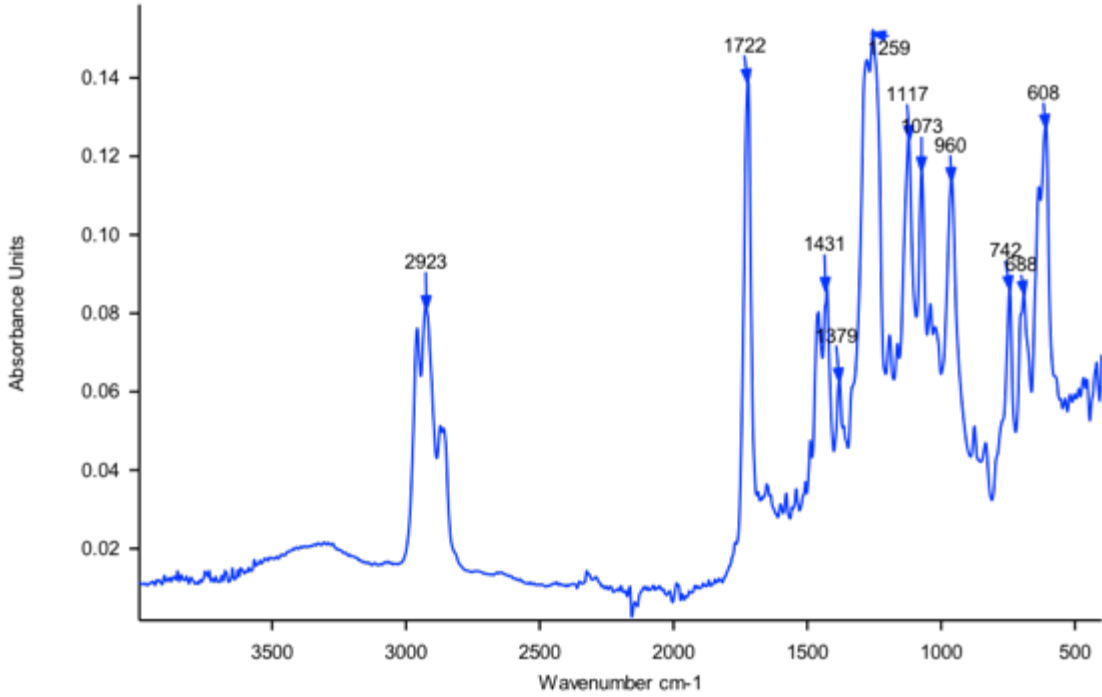


⁵ Nach Y. Shashoua: *Conseravtion of plastics*, 2008.

Probennameort der Probe 1 (Netzteil)



Ergebnis der Probe 1 (Netzteil)



Das FTIR-Spektrum der Kabelummantelung des Netzteils (Probe 1), stimmt gut mit dem Spektrum von Polyvinylchlorid (Datenbanken SAMCO EU-Projekt POPART), überein.

Das FTIR-Spektrum hat Absorptionsbanden bei 2923 cm^{-1} (CH_2 und CH Streckschwingungen), 1722 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$ Streckschwingung), 1431 cm^{-1} (CH_2 in-plane Deformationsschwingung), 1379 cm^{-1} (CH Streckschwingung), 1259 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}$ Streckschwingung), 1117 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}$ Streckschwingung), 1073 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}$ Streckschwingung), 960 cm^{-1} ($\text{C}-\text{C}$ Streckschwingung), 742 cm^{-1} (CH Streckschwingung) und 608 cm^{-1} ($\text{C}-\text{Cl}$ Streckschwingung), welche typisch für weich PVC sind ⁶.

⁶ Nach Y. Shashoua: *Conseravtion of plastics*, 2008.

Probenentnahme durch Objekt- und Restaurierungsforschung am Deutschen Museum

Objekt: Apple iBook G3 in „Graphite“ aus dem Deutschen Museum München

Inv. Nummer: 2012-1213T1 (Notebook)
2012-1213T2 (Netzteil)

Fragestellung: Aus welchen Materialien bestehen die Hauptkomponenten des Gehäuses und des Netzteils?

Probenentnahme: Marisa Pamplona

Bilder: Janine Köppen

Probe 1: Rückseite, an Schraubenloch, blau-grau, weich

Probe 2: Rückseite, an Schraubenloch, weiß, hart

Probe 3: Oberseite, blau-grau, weich

Probe 4: Oberseite, weiß, hart, spröde

Probe 5: Maustaste, blau-grau, transparent, hart

Probe 6: Taste, weiß, transparent, hart

Probe 7: Touchpad, weiß, hart

Messung 8: Netzteil, Kabelummantelung, transparent, weich, verformt

Messung 9: Netzteil, Kabelummantelung, transparent, weich

Übersicht der Proben 1-2



Übersicht der Proben 3-4



Übersicht der Proben 5-6



Übersicht M8 und M9 (Netzteil)

