

Dr.-Ing. Elisabeth Wilhelm

**»Haptischer Schlüssel zur Digitalen Welt«**

Entwicklung kostengünstiger, großflächiger Brailledisplays für ein inklusives Internet

Der vorliegende Beitrag wurde beim Deutschen Studienpreis 2016 mit einem 1. Preis in der Sektion Natur- und Technikwissenschaften ausgezeichnet. Er beruht auf der 2015 am Karlsruher Institut für Technologie eingereichten Dissertation »Entwicklung eines mikrofluidischen Brailledisplays« von Dr. Elisabeth Wilhelm.

## Haptischer Schlüssel zur Digitalen Welt

### Entwicklung kostengünstiger, großflächiger Brailledisplays für ein inklusives Internet

Dr. Elisabeth Wilhelm

Im Alltag werden wir ständig von modernen Kommunikationsmitteln wie Smartphones und Computern begleitet. Wir nutzen sie nicht nur, um unsere sozialen Kontakte aufrechtzuerhalten und unsere Freizeitaktivitäten zu organisieren. Auch in der modernen Arbeitswelt werden wir ständig mit derartigen Geräten konfrontiert. Dem sicheren Umgang mit Computern und ähnlichen Geräten muss in der modernen Gesellschaft daher ein besonders hoher Stellenwert zugemessen werden. Um die Bedienung der Geräte für den Normalverbraucher zu erleichtern, versuchen die Hersteller, Programme und Betriebssysteme so intuitiv wie möglich zu gestalten. Anstelle einer Kommandozeile, in die man den Namen eines zu startenden Programmes eingeben kann, steht heute meist eine grafische Benutzeroberfläche. Diese enthält zahlreiche Piktogramme. Wird eines der Piktogramme aktiviert, indem man es mit der Computermouse anklickt oder das Touch-Display an der entsprechenden Stelle mit dem Finger berührt, so öffnet sich das Programm. Auch die Anwender moderner Kommunikationstechnologien haben längst entdeckt, dass ein Bild oft mehr sagen kann als tausend Worte. In zahlreichen Textnachrichten werden komplexe Sachverhalte, wie etwa Gefühle, durch grafische Symbole ersetzt. Häufig werden hierzu Smileys, auch Emoticons genannt, verwendet.

All diese grafischen Erleichterungen und Abkürzungen haben allerdings eines gemein: Sie setzen voraus, dass man sie sieht. Computernutzern, die den Inhalt des Bildschirms nicht erkennen können, bleiben grafische Elemente häufig verborgen. Dies betrifft einen großen Teil der Sehgeschädigten, zu denen nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation weltweit im Jahr 2014 circa 285 Millionen Menschen zählten. Um dennoch an der modernen Kommunikationsgesellschaft teilhaben zu können, nutzen Sehgeschädigte mit einem gewissen Restsehvermögen den Bildschirminhalt durch stark vergrößernde Programme. Wer auch den vergrößerten Inhalt nicht wahrnehmen kann, greift häufig auf Sprachausgabeprogramme zurück. Diese Programme lesen dem Nutzer vor, was auf dem Bildschirm angezeigt wird. Bilder können die Programme jedoch nur dann beschreiben, wenn sie mit einer textbasierten Bildbeschreibung versehen sind. Die Anzahl der barrierefreien Internetseiten, die für jedes Bild eine sinnvolle Umschreibung bieten, ist jedoch bis heute gering. Der Grund hierfür liegt nicht nur darin, dass viele Anbieter den zusätzlichen Arbeitsaufwand scheuen. Zahlreiche Grafiken sind einfach zu komplex, um ihren Inhalt in einem sinnvollen Kurztext zu beschreiben. Ein Beispiel hierfür sind mathematische Graphen, die zur Darstellung von Wetterveränderungen, Wechsel- und Börsenkursen oder Umfrageergebnissen genutzt werden.

Interessiert sich ein Sehgeschädigter für den Inhalt eines solchen Graphen, so muss er ihn auf einem speziellen taktile Grafiken generierenden Drucker ausdrucken. Im Gegensatz zu einer normalen Grafik ist eine taktile Grafik nicht zweidimensional. Damit man die unterschiedlichen Linien und Schraffuren mit dem Tastsinn wahrnehmen kann, müssen diese aus der Paperoberfläche herausstehen. Eine Möglichkeit, dies zu gewährleisten, ist es, dunkle Pixel mit einem kleinen Stempel von hinten in das Papier einzudrücken. Dies führt dazu, dass das Papier sich an dieser Stelle aufwölbt und der Bildpunkt als taktiles Pixel (kurz: Taxel) ertastet werden kann. Durch die Höhe der Taxel können zusätzliche Informationen wie zum Beispiel die Farben dargestellt werden. Die Beschriftungen innerhalb der Grafik werden mit Hilfe der Blindenschrift codiert. Diese in der Regel nach ihrem Erfinder Louis Braille benannte Schrift besteht in ihrer ursprünglichen Form aus einem rechteckigen Feld mit vorgegebenen Abmessungen, das sechs Taxel beinhaltet. Die Taxel sind dabei so angeordnet wie die Zahl sechs auf einem herkömmlichen Würfel. Welcher Buchstabe dargestellt wird, ergibt sich aus der Anzahl und der Position der Taxel, die aus dem Papier hervorstehen. Um außer den normalen Buchstaben auch Sonderzeichen darstellen zu können, wird heutzutage häufig das sogenannte Euro-Braille genutzt. Hierbei handelt es sich um eine Erweiterung der Blindenschrift, die acht Taxel verwendet und so mehr Zeichen kodieren kann.

Obwohl einige Drucker taktile Grafiken darstellen können, kann man nicht jedes beliebige Bild einfach ausdrucken. Da der Tastsinn eine geringere Auflösung aufweist als das menschliche Auge, müssen zunächst die wichtigsten Details der Grafik identifiziert werden. Gleichzeitig muss die Anzahl der verwendeten Farben reduziert werden und dafür gesorgt werden, dass Schriftzeichen nicht auf einem schraffierten oder farbigen Hintergrund liegen. In den meisten Fällen müssen Grafiken, die für die visuelle Datenübertragung gedacht sind, daher von einem sehenden Computernutzer vorbearbeitet werden, bevor sie gedruckt werden können. Zudem sind die Drucker, die in der Lage sind, taktile Grafiken zu erzeugen, sehr teuer und stehen nur wenigen Betroffenen zur Verfügung.

Großflächige, grafikfähige taktile Displays könnten Sehgeschädigten den Zugang zu Grafiken erleichtern. Diese Displays bestehen aus einer Vielzahl von kleinen Stiften, die sich, je nachdem, ob sie einen schwarzen oder einen weißen Bildpunkt darstellen sollen, aus der Displayoberfläche herauschieben oder hinter diese zurückziehen. Solche Displays werden zurzeit allerdings nur von sehr wenigen Firmen hergestellt. Der Preis, den diese Firmen für ein großflächiges Display verlangen, liegt bei 50.000 €. Damit ist das Display für den Normalverbraucher und die meisten Bildungseinrichtungen unerschwinglich. Zudem wiegen solche Displays mehr als vier Kilogramm. Da sie nur in Verbindung mit einem externen Desktop-Computer oder Laptop betrieben werden können, muss man beinahe sechs Kilogramm transportieren, wenn man das Display nicht nur an einem Standort benutzen möchte.

Der Grund für den hohen Preis und das hohe Gewicht der momentan am Markt verfügbaren Displays liegt in den Antriebselementen. Diese übersetzen die Steuersignale des Computers in eine lineare Bewegung der Stifte, um die Tactel darzustellen. Diese Antriebselemente bestehen in der Regel aus piezoelektrischen Materialien. Das Besondere an diesen Materialien ist, dass sie mechanischen Druck in eine elektrische Spannung umwandeln können. Werden die Materialien als Antriebselemente eingesetzt, so wird der umgekehrte piezoelektrische Effekt genutzt. Dieser äußert sich darin, dass sich die Materialien verformen, wenn ein elektrisches Feld angelegt wird. Die Materialien sind in der Lage, eine große Kraft zu erzeugen. Allerdings ist die Höhe der Ausdehnung so gering, dass man sie nicht direkt ertasten kann. Die erzeugte Kraft muss durch einen Hebelarm umgelenkt werden. Ähnlich wie bei einer Wippe, auf der zwei unterschiedlich schwere Kinder spielen, drückt das starke Antriebselement das andere, leichtere Ende weit nach oben, sodass man in dem betreffenden Bereich einen großen Hub ertasten kann. Der Nachteil des Umlenkungsmechanismus ist, dass er das Gewicht und die Größe des Displays maßgeblich beeinflusst. Hinzu kommen die hohen Kosten für die Beschaffung der piezoelektrischen Materialien.

Es ist daher nicht verwunderlich, dass die meisten Sehgeschädigten anstelle eines großflächigen Brailledisplays einzeilige Brailledisplays verwenden. Diese können bis zu 80 Einzelbuchstaben anzeigen. Sie kommen somit in etwa mit einem Zehntel der Antriebselemente aus, die im bisher größten kommerziell erhältlichen grafikfähigen Brailledisplay verbaut sind. Da der Preis linear mit der Anzahl der Antriebselemente ansteigt, sind die Anschaffungskosten für ein einzeiliges Display wesentlich geringer als die für großflächige Brailledisplays. Der Nachteil der einzeiligen Displays ist jedoch, dass sie ebenso wie die Sprachausgabeprogramme nur textbasierte Informationen darstellen können. Um möglichst vielen Sehgeschädigten den Zugang zu digitalen Grafiken zu ermöglichen, müssen folglich neue Antriebsprinzipien entwickelt werden, die eine kostengünstigere Produktion der großflächigen grafikfähigen Brailledisplays erlauben.

### **Die Randbedingungen**

Der Blick in die Fachliteratur zeigt, dass sich die Förderorganisationen und Wissenschaftsinstitute dieses Problems seit längerer Zeit bewusst sind. Zahlreiche Zeitschriftenbeiträge berichten von erfolgreichen Versuchen zur Herstellung günstigerer Antriebselemente. Die Frage, warum bisher keines dieser Konzepte in ein erfolgreiches Produkt umgesetzt werden konnte, bleibt hingegen unbeantwortet.

Ein Produkt kann nur dann erfolgreich am Markt eingeführt werden, wenn es den Anforderungen der Zielgruppe genügt oder diese übertrifft. Um dies zu gewährleisten, wurden im Rahmen der hier beschriebenen Arbeit zunächst die Anforderungen der Sehgeschädigten genauer definiert. Im Gegensatz zu den Lösungsansätzen werden diese Anforderungen in der wissenschaftlichen Literatur kaum diskutiert. Lediglich zwei Aufsätze beschäftigen sich mit dem Thema, wie das ideale Brailledisplay aussehen könnte. Allerdings finden sich auch in diesen Aufsätzen über viele Kenndaten, wie beispielsweise den Preis des Displays, die notwendige Auflösung und die Bildwiederholrate, keine genauen Angaben. Nachdem die Fachwelt die notwendigen Daten nicht bereitstellt, wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes den Betroffenen selbst die Möglichkeit gegeben, die Entwicklung des Brailledisplays maßgeblich mitzugestalten.

Hierzu wurde ein barrierefreier Online-Fragebogen entwickelt und an Sehgeschädigte sowie deren Ausbilder und Betreuer versandt. Bei der Wahl des Umfragemediums wurde absichtlich ein modernes Kommunikationsmittel gewählt. Hierdurch sollten besonders jene Sehgeschädigten angesprochen werden, die häufig mit dem Computer arbeiten. Sie wären bei der Vermarktung des großflächigen Brailledisplays die Hauptzielgruppe. Der im Vergleich zur anvisierten Zielgruppe hohe Rücklauf von 69 Fragebögen kann bereits als erster Indikator für ein hohes Interesse an dem Thema gewertet werden. Unter den Einsendern, deren Alter zwischen 17 und 70 Jahren lag, befanden sich unter anderem 29 Blindgeborene und 20 Späterblindete. Allen Teilnehmern war gemein, dass sie einen hohen Anteil ihrer Zeit mit der Arbeit an einem Computer verbringen. In der Umfrage bekundete eine Mehrheit von 62 % der Befragten ihr Interesse am Erwerb eines großflächigen Brailledisplays.

Eine ausführliche Darstellung aller Informationen, die in den insgesamt 28 Fragen des Online-Fragebogens erhoben wurden, würde den Rahmen der vorliegenden Ausführungen überschreiten. Daher werden hier nur jene Angaben diskutiert, die direkten Einfluss auf die Gestaltung des entwickelten Brailledisplays hatten. Hierzu gehört die Frage nach dem Kaufinteresse, der notwendigen Auflösung, dem angemessenen Preis, der gewünschten Displaygröße, dem zulässigen Gewicht und der Schaltcharakteristik der zu verwendenden Antriebsselemente.

Der zur Verfügung stehende Bauraum ist eine der wichtigsten Kenngrößen bei der Auswahl eines geeigneten Antriebsprinzips. Dieser wird maßgeblich durch die Auflösung des Brailledisplays vorgegeben. Wie auch bei visuellen Grafiken hängt die Qualität einer taktilen Grafik in erster Linie von eben dieser Auflösung ab. Leider lassen sich die Taxel im Gegensatz zu den Pixeln jedoch nicht beliebig verkleinern. Das liegt an der Auflösung des Tastsinns. Damit die Taxel eines Textdokumentes gut erkannt werden können und somit den Lesefluss nicht behindern, müssen sie eine bestimmte dreidimensionale

Form aufweisen. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Höhe des einzelnen Taxels. Sie soll mindestens 500 Mikrometer betragen. Das entspricht einem halben Millimeter. Zudem hat das ideale Taxel eine runde Grundfläche und wölbt sich kugelförmig nach oben. Solange der Durchmesser des die Grundfläche bildenden Kreises größer ist als dieses Maß, ist das Taxel ein gut tastbarer Kugelabschnitt. Hat die Grundfläche einen Durchmesser von genau einem halben Millimeter, so bildet das Taxel eine Halbkugel. Unterschreitet der Durchmesser des Grundkreises dieses Maß, so wird es schwieriger, das Taxel kugelförmig zu gestalten. Entweder wäre das Taxel an der Stelle, an der es aus dem Display heraustritt, dünner als im darüber liegenden Bereich, oder es müsste auf einen Zylinder aufgesetzt werden. In beiden Fällen wäre die Umrandung nicht mehr klar zu erkennen. Um dies zu verhindern, wurde in der deutschen Industrienorm (DIN 32976:2007-08) ein Grundkreisdurchmesser von 1,3 Millimetern als Standard zur Herstellung von Taxeln für Brailledisplays festgelegt. Die Norm regelt außer der Größe und der Form der Taxel auch die Abstände, die zwischen den einzelnen Taxeln einzuhalten sind, um eine gute Lesbarkeit der Schriftzeichen zu gewährleisten. In Anlehnung an Louis Brailles ergonomische Anpassung der Blindenschrift sind die Schriftzeichen so ausgelegt, dass die sechs beziehungsweise acht Taxel, die einen Buchstaben bilden, genau unter eine Fingerkuppe passen. Der Abstand zwischen den einzelnen Buchstaben ist größer gehalten als der zwischen den Taxeln eines Buchstabens. Dies soll dem Leser helfen, die unterschiedlichen Buchstaben voneinander abzugrenzen. Bei der Grafikedarstellung sind diese Abstände jedoch hinderlich, weil sie sich als Lücken in den Umrisslinien niederschlagen. Grafikfähige Drucker benutzen daher unterschiedliche Auflösungen für Text- und Bilddarstellungen. Dies ist allerdings bei einem Brailledisplay nicht möglich, da es bedeuten würde, dass man die Antriebselemente zusammen- und auseinanderschieben müsste. Um dennoch in der Lage zu sein, text- und bildbasierte Information wiederzugeben, verwenden am Markt erhältliche großflächige Brailledisplays äquidistante Anordnungen. Dabei werden alle Taxel mit gleichem Abstand zueinander angeordnet. Dieser Kompromiss beeinflusst die Schriftdarstellung am wenigsten. Ein Kompromiss zwischen der Auflösung eines grafikfähigen Druckers und der zur Schriftdarstellung benötigten Auflösung wird auch von der Mehrheit der Umfrageteilnehmer bevorzugt, so dass die äquidistante Anordnung der Taxel in das Lastenheft mit aufgenommen wurde. Um die gewünschte Auflösung zu erreichen, müssen mehr als 9.000 Antriebselemente auf der Fläche eines DIN-A4-Blattes untergebracht werden. Technisch gesehen bedeutet dies, dass für jedes Antriebselement eine Grundfläche von weniger als zweieinhalb auf zweieinhalb Millimeter zur Verfügung steht.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, skaliert der Preis mit der Anzahl der Antriebselemente. Ein angemessener Preis läge nach Meinung von 22 % der Befragten unter 3.000 €. Ein Großteil der Umfrageteilnehmer würde sich das Brailledisplay allerdings nur dann zulegen, wenn ihre Versicherung oder ihr Arbeitgeber dafür aufkäme. Diese Kostenträger übernehmen im Moment die

Anschaffungskosten für die einzeiligen Displays und wären in der Zukunft sicherlich dazu bereit, ein Gerät zu finanzieren, das für einen geringeren Preis einen deutlich höheren Nutzwert bietet. Somit wurde als Entwicklungsziel festgelegt, dass das Brailledisplay weniger als 3.000 € Kosten soll. Damit läge es deutlich unterhalb des heute üblichen Marktpreises für Braillezeilen. Geht man von den etwa 9.000 Antriebselementen aus, die bei der gewünschten Auflösung für ein DIN-A4-Display benötigt würden, so würde dies bedeuten, dass der Herstellungspreis für jedes einzelne Antriebselement nur wenige Cent betragen darf.

Die Anzahl der zu verwendenden Antriebselemente wird auch durch die Displaygröße beeinflusst, die sich die Befragten wünschen. Diese variierte stark, wobei sich 42 % der Befragten für ein Brailledisplay in der Größe eines Tablet-PCs aussprachen und 32 % der Befragten ein Display in DIN-A4-Format bevorzugten. Technisch gesehen sollte man daher eine modulare Lösung anstreben, bei welcher der Nutzer die Displaygröße durch die Verbindung mehrerer Einzelgeräte an seine Bedürfnisse anpassen kann. Gleichzeitig muss man weiterhin davon ausgehen, dass das gesamte Display aus 9.000 Antriebselementen besteht. Zudem sollte das Brailledisplay nach der Meinung von 51 % der Befragten nur in etwa so viel wiegen wie ein Tablet-PC. 41 % der Umfrageteilnehmer könnten sich auch mit einem Display anfreunden, dessen Gewicht dem eines handelsüblichen Laptops entspricht. Der Wunsch nach einem leichten Display rührt daher, dass eine deutliche Mehrheit der Befragten das Brailledisplay als tragbares Gerät an mehreren Arbeitsplätzen einsetzen möchte. Um sich klarzumachen, was diese Anforderungen für die im Brailledisplay zu verwendende Technik bedeuten, hilft es, einen Vergleich heranzuziehen. Eine Münze im Wert von einem Cent wiegt genau 2,3 Gramm, das würde etwa 46 Antriebselementen entsprechen. Man könnte das Display folglich mit 196 Münzen aufwiegen. Dieser Vergleich zeigt, dass die Erzielung des Wunschgewichtes bei einer angestrebten Anzahl von 9.000 Taxeln technisch eine sehr große Herausforderung darstellt.

Das vorgegebene Gewicht, der Bauraum und der anzustrebende Herstellungspreis weisen bereits darauf hin, dass es sich bei den einzusetzenden Antriebselementen um mikrotechnologische Bauteile mit Abmessungen im Mikrometerbereich handeln muss. Um zu ermitteln, welche der vielfältigen Möglichkeiten dieses Technologiefeldes zum Einsatz kommen soll, muss man die Schaltcharakteristik genauer definieren. Diese wird vor allem durch die gewünschte Bildwiederholrate vorgegeben. Gemäß den Angaben der in der Online-Umfrage befragten Personen sollte die Bildwiederholrate unter 0,1 Hertz liegen, was gleichbedeutend damit ist, dass das Display weniger als zehn Sekunden für den Aufbau eines neuen Bildes benötigen soll. Außerdem wünschten sich 46 % der Befragten, dass die Höhe der Taxel veränderbar sein sollte.

Zu den in der Online-Umfrage ermittelten Randdaten kommt noch die Anforderung hinzu, dass die Antriebselemente in der Lage sein müssen, die Tasteroberfläche lokal um einen halben Millimeter anzuheben und dabei Kräften von mehreren Hundert Millinewton standzuhalten. Antriebselemente, die gleichzeitig eine große Auslenkung und hohe Kräfte generieren können, sind in der Mikrotechnologie sehr selten. Deshalb wurden diese beiden Funktionen beim Aufbau des Brailledisplays getrennt.

## Der Aufbau

Da insbesondere der Herstellungspreis mit der Komplexität des zu fertigenden Gerätes steigt, wurde beim Aufbau des Brailledisplays darauf geachtet, die Konstruktion so einfach wie möglich zu gestalten. Im Prinzip besteht das Brailledisplay aus einem Plastikquader (Chip), der von einem mit Wasser gefüllten Kanalsystem durchzogen ist. Es gibt einen seitlichen Einlass, von dem zahlreiche Kanäle abzweigen. Jeder dieser Kanäle endet in einer runden Öffnung an der Oberfläche des Chips. Um das Wasser im Chip einzuschließen und Taxel darstellen zu können, ist die gesamte Oberfläche mit einer flexiblen Membran überzogen. Eine eigens für das Brailledisplay entwickelte Klebetechnik stellt sicher, dass die Membran dicht mit dem Gehäuse abschließt. Der Einlass des Kanalsystems ist mit einer speziell für das Brailledisplay konstruierten Pumpe verbunden. Sollen die Taxel aktiviert werden, so schiebt die Pumpe, ähnlich wie eine Spritze, Wasser in das Kanalsystem. Da alle Auslässe des Kanalsystems mit der flexiblen Membran überzogen sind, kann das Wasser dem Chip aber nicht entweichen. Stattdessen wölbt es die Membran über den runden Öffnungen auf. Die Höhe der Aufwölbung kann über das Wasservolumen eingestellt werden, das die Pumpe in das Kanalsystem schiebt. Um die Punkte zu löschen, bewegt man den Kolben der Pumpe in die entgegengesetzte Richtung. In diesem Fall saugt die Pumpe das Wasser aus dem Kanalsystem, und die Membran senkt sich wieder.

Benutzt man nur die Pumpe, das Kanalsystem und die flexible Membran, so bewegen sich immer alle Taxel. Man kann folglich nur eine farbige Papierseite darstellen. Die Farbe wird hierbei über die in acht Stufen einzustellende Höhe der Taxel kodiert. Ein weiterer Nachteil ist, dass man die Flüssigkeit innerhalb des Kanalsystems verschieben kann, wenn die Pumpe still steht. Sind beispielsweise alle Taxel bis zur Hälfte gefüllt und drückt man mit dem Finger fest auf einige von ihnen, so wird man diese Taxel löschen, während die anderen Taxel sich stärker aufwölben. Folglich muss eine weitere Komponente verwendet werden, welche die Ansteuerung einzelner Taxel ermöglicht und gleichzeitig gewährleistet, dass das Display den beim Lesen auftretenden Kräften standhält. In der Fluidtechnik nennt man Stellglieder zur Regelung des Flüssigkeitsflusses Ventile. Im Endeffekt übernimmt ein Ventil dieselbe Funktion wie ein Wasserhahn an einer Rohrleitung. Es kontrolliert, ob und wie viel Wasser durch einen bestimmten Kanalzweig fließen kann. Im Gegensatz zu dem Stellglied, das in einem handelsüblichen Wasserhahn



verbaut ist, müssen die Ventile des Brailledisplays jedoch sehr klein sein, damit sie die Bauraumbeschränkungen nicht überschreiten. Ventile, deren Abmessungen im Mikrometerbereich liegen, werden Mikroventile genannt. Sie basieren auf den unterschiedlichsten Wirkprinzipien, je nachdem, wie stark der zu regulierende Flüssigkeitsstrom ist. Unter den kommerziell erhältlichen Mikroventilen findet man unter anderem Ventile, die auf ähnlichen Antriebselementen beruhen, wie die am Markt erhältlichen Brailledisplays. Ebenso wie die Antriebselemente der Brailledisplays haben diese kommerziell erhältlichen Mikroventile den Nachteil, dass sie vergleichsweise groß und teuer sind. Daher wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch die Ventile speziell für das Brailledisplay entwickelt.

Bei dieser Entwicklung galt es, die Kosten so niedrig wie möglich zu halten, da für jedes der 9.000 Taxel ein eigenes Mikroventil benötigt wird. Deshalb besteht das eigens für das Brailledisplay entwickelte Ventil aus einem einfachen kleinen Plastikschlauchstück und einer geringen Menge an Kerzenwachs. Um die beiden Komponenten als Ventil verwenden zu können, füllt man das Wachs in das Schlauchstück. Steckt man diese Schlauchstücke in die runden Auslassöffnungen des Kanalsystems und verschließt dann ihre Oberseite mit der flexiblen Membran, so verstopft man den Weg, den das Wasser nehmen kann. Die Membran lässt sich nun nicht mehr aufwölben. Im Gegensatz zu der im gewöhnlichen Haushalt auftretenden Rohrverstopfung lässt sich die Verstopfung in den Schlauchstücken jedoch leicht beheben. Hierzu muss lediglich das Wachs erwärmt werden. Überschreitet man hierbei die Schmelztemperatur des Wachses, die in etwa bei 50 °C liegt, so wird das Wachs flüssig. Nun lässt es sich mit Hilfe der Pumpe und des Wassers im Kanalsystem verschieben. Dank des Dichteunterschieds zwischen dem Wasser und dem Kerzenwachs ist dabei sichergestellt, dass das Wachs im Schlauchstück verbleibt und nicht in das unterhalb gelegene Kanalsystem fließt. Um ein Taxel zu setzen, schmilzt man das Wachs und drückt es mit Hilfe der Pumpe gegen die Membran, sodass sich diese aufwölbt. Lässt man das Wachs anschließend in dieser Position erkalten, so stabilisiert sich die Aufwölbung. Das heißt, sie bleibt auch dann erhalten, wenn man die Pumpe ausschaltet. Der Schaltzustand ändert sich nun nur noch für jene Taxel, bei denen das Wachs gerade geschmolzen ist.

Um die einzelnen Taxel gezielt ansteuern zu können, benötigt man nun eine Möglichkeit, die einzelnen Schlauchstücke gezielt zu erwärmen. Die erste Idee, die hier untersucht wurde, war die Verwendung eines Heizdrahtes, der außen um das Röhrchen gewickelt wird. Ein Heizdraht ist ein elektrischer Widerstand, der sich erwärmt, wenn man elektrischen Strom an ihn anlegt. Die Menge an erzeugter Wärme hängt von der Größe des elektrischen Widerstands ab. Dieser wiederum ist abhängig von dem verwendeten Material und dem Querschnitt des Drahtes. Kommerziell erhältliche Heizdrähte bestehen daher aus Legierungen, die einen äußerst hohen Widerstand haben. Zudem sind sie extrem dünn, wodurch sie einen geringen Querschnitt und somit einen noch höheren Widerstand aufweisen. Ein

derartiger Draht wurde mit Hilfe einer Wickelmaschine um das Röhrchen gewickelt. Um zu verhindern, dass die entstehende Spule ein Elektromagnet wird, wurden immer jeweils zwei Drähte, die von dem Strom in entgegengesetzter Richtung durchflossen werden, nebeneinandergelegt. Aufgrund des entgegengesetzten Stromflusses in den beiden Drähten heben sich die entstehenden Magnetfelder gegenseitig auf, statt sich wie bei einer normalen Spule zu addieren. Diese Technik wird als bifilares Wickeln bezeichnet. Um die Verbindung zu einer Spannungsquelle herzustellen und dabei die Heizwiderstände über eine Computersteuerung ein- oder ausschalten zu können, wurden die beiden Enden jedes gewickelten Heizwiderstandes mit einer Platine verbunden, auf der sich je Taxel eine Diode befindet. Die Dioden, die auf der Platine montiert sind, muss man sich wie einen kleinen automatischen Schalter vorstellen. Bekommen sie vom Steuerungscomputer ein Signal, so erlauben sie, dass Strom durch sie hindurchfließt. Bleibt das Signal aus, so sperren sie die Leiterbahn, und der Stromfluss erreicht den entsprechenden Heizwiderstand nicht. Somit kann der Computer bestimmen, in welchen Heizdrahtspulen Strom fließen und an welcher Stelle dadurch das Wachs zum Schmelzen gebracht werden soll.

Erste Versuche mit den umwickelten Schlauchstückchen waren sehr vielversprechend. Das Wachs innerhalb der kleinen Schlauchstückchen schmolz in elf Sekunden und erstarrte innerhalb von zwölf Sekunden. Die gewünschte Bildwiederholrate verfehlte das Display damit zwar noch. Durch eine Verkürzung des Schlauchstückes, die zu einer Verringerung des aufzuschmelzenden Wachsvolumens führen würde, oder eine Erhöhung der elektrischen Leistung ließe sich dies jedoch beheben. Um zu überprüfen, ob man die auf diese Weise erzeugten Taxel zur Darstellung von Blindenschrift verwenden kann, wurde ein Demonstrator mit sechs Taxeln aufgebaut. Aus Sicherheitsgründen wurde dieser Demonstrator zunächst mit manuellen Schaltern versehen. Zudem wurden die Taxel etwas größer gestaltet als in den Aufbauten, die zur Überprüfung der technischen Kennwerte genutzt wurden. Dies erleichtert die Überprüfung der elektrischen Verbindungen und stellt sicher, dass mögliche Leckagen frühzeitig erkannt werden. Mit Hilfe dieses Demonstrators konnte nachgewiesen werden, dass Sehgeschädigte die mit Hilfe der kleinen Schlauchstücke erzeugten Taxel erkennen können. Die Testperson konnte es sogar wahrnehmen, wenn ein Taxel anfang zu »wachsen«. Dies zeigt, dass die erzeugte Kraft hoch genug ist, um sich gegen den Druck, den die Finger beim Lesen auf das Display ausüben, durchzusetzen. Dies konnte an kleinen Antriebs-elementen bei der Erhebung der technischen Kenn-daten bestätigt werden. Nach diesen Messungen können die mit Hilfe der Schlauchstücke gesetzten Taxel sogar einer Kraft von 2,5 Newton widerstehen. Die beim Lesen auftretenden Kräfte betragen demgegenüber nur etwa 0,1 Newton.

Nach erfolgreichen Vorversuchen mit Aufbauten, die zwischen sechs und acht Antriebs-elemente enthielten, wurde ein Aufbau mit mehreren Hundert Taxeln angestrebt. Für eine so große Anzahl an Taxeln wäre das Wickeln von Hand zu zeitaufwendig gewesen. Daher wurde bereits in dieser frühen Phase der Entwicklung über eine Automatisierung nachgedacht. Es stellte sich jedoch heraus, dass ein industriell hergestelltes umwickeltes Schlauchstückchen in etwa 1,95 € kosten würde. Auch wenn man von einer Serienfertigung ausgehen würde, könnte dieser Preis innerhalb Europas nicht unterboten werden. Dies ist mit der Forderung, das gesamte Display solle unter 3.000 € kosten, nicht vereinbar. Das Schlauchstück und das Wachs sind nahezu kostenneutral. Der Heizdraht und die Kosten für das Umwickeln der Röhrchen trieben den Preis jedoch in die Höhe. Es galt deshalb, ein günstigeres Heizkonzept zu finden.

Wärmebildaufnahmen der umwickelten Röhrchen hatten außerdem gezeigt, dass ein Großteil der erzeugten Wärme nicht in das Wachs abgegeben, sondern nach außen abgestrahlt wurde. Das führt dazu, dass das Display deutlich mehr Energie verbraucht, als zum Schmelzen des Wachses eigentlich nötig gewesen wäre. Dies ist nicht nur aus Umweltschutzgründen zu vermeiden. Bei tragbaren Geräten bestimmt der Energieverbrauch maßgeblich die Größe des mitzuführenden Akkus. Dieser ist für einen Großteil des Gewichtes verantwortlich. Um eine möglichst große Menge der erzeugten Wärme in das Wachs einzuleiten, wäre es am besten, wenn die Wärme in der Mitte des Schlauchstückes erzeugt würde. Dann würde sie auf ihrem Weg nach außen das Wachs schmelzen. Schiebt man allerdings eine Spule in das kleine Schlauchstück und füllt dieses anschließend mit Wachs, so lässt sich das Wachs im geschmolzenen Zustand nicht mehr so gut hin und her schieben. Die Spule versperrt ihm den Weg. Ein Ansatz, der in der Mikrotechnologie bei diesen Problemen Verwendung findet, benutzt das aufzuschmelzende Material selbst als Heizelement. Leider ist Wachs hierfür denkbar ungeeignet, da es elektrischen Strom nicht leitet. Andererseits ist Wachs extrem günstig, besitzt eine geringe Dichte und kann die beim Tasten entstehenden Kräfte aufnehmen.

Um Kerzenwachs leitfähig zu machen, muss man leitfähige Partikel unterrühren. Ein Beispiel für Partikel, die häufig zur Änderung der elektrischen Eigenschaften von Materialien herangezogen werden, sind Nanopartikel aus Metall. Diese besitzen allerdings eine deutlich höhere Dichte als Wachs. Sie würden zu Boden sinken, wenn man das Wachs aufschmilzt, und der erzielte Effekt würde innerhalb weniger Schaltzyklen verloren gehen. Carbon-Black-Partikel, auch als Ruß bekannt, besitzen hingegen eine ähnliche Dichte wie Wachs und bilden mit diesem daher ein stabiles, elektrisch leitfähiges Gemisch. Ruß ist zudem eine Substanz, die man für einen sehr geringen Preis erwerben kann, was im Hinblick auf die Kostenbeschränkung bei der Entwicklung des Brailledisplays von großem Vorteil ist. Um nachzuweisen, dass das Gemisch aus Wachs und Ruß für den Einsatz in einem Brailledisplay geeignet ist, wurde ein

kleiner Demonstrator mit drei Schlauchstücken aufgebaut. An diesem konnte gezeigt werden, dass Schlauchstückchen gefüllt mit Ruß und Wachs Taxel darstellen können. Im Gegensatz zu den umwickelten Schlauchstücken strahlen die mit Ruß und Wachs gefüllten Röhrchen zudem deutlich weniger Wärme ab, was durch einen Vergleich von Wärmebildkameraaufnahmen belegt werden konnte. Dass sich der Ruß und das Wachs nicht entmischen, wurde in einer Untersuchung der Langzeitstabilität gezeigt. Hierzu wurde ein einzelnes Taxel über zehn Stunden hinweg immer wieder für eine Minute ein- und eine weitere Minute ausgeschaltet. Dabei wurden die Temperaturverläufe und die elektrische Leitfähigkeit aufgezeichnet. Dieser Versuch ergab, dass das Taxel eine ausreichende Langzeitstabilität aufweist, um in einem großflächigen Brailledisplay eingesetzt zu werden.

Um abschließend zu zeigen, dass die Verwendung des mit Ruß vermengten Wachses den Aufbau eines großflächigen Brailledisplays ermöglicht, wurde ein Demonstrator mit 200 einzelnen Taxeln gefertigt. Bei der Inbetriebnahme dieses Demonstrators zeigte sich jedoch ein Nachteil der manuellen Fertigung. Die Schnittkanten der Schlauchstücke waren zu ungleichmäßig, sodass es häufig zu Leckagen kam. Dennoch konnte an diesem Aufbau gezeigt werden, dass es durchaus möglich ist, ein großflächiges Brailledisplay mit dieser Technologie kostengünstig herzustellen.

## **Ergebnis**

Das Ziel dieser Arbeit war es, eine Alternative zu den heute verwendeten Brailledisplays aufzuzeigen, die Sehgeschädigten den Zugang zu digitalen Grafiken und damit die Teilhabe an der modernen Kommunikationsgesellschaft ermöglicht. Bei der Entwicklung wurden die Bedürfnisse der Anwender in den Vordergrund gestellt. Dies sollte sicherstellen, dass das zu entwickelnde Gerät im Gegensatz zu den bisher in der Literatur vorgeschlagenen Konzepten ein hohes Marktpotenzial besitzt. Im Folgenden wird überprüft, ob die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Demonstratoren den in der Online-Umfrage unter potenziellen Nutzern ermittelten Anforderungen genügen.

Eine dieser Anforderungen besagte, das Display solle eine Bildwiederholrate von 0,1 Hertz besitzen. Zum Schmelzen des Wachses werden im aktuellen Aufbau zwölf Sekunden benötigt. Zum Aufbauen eines neuen Bildes müsste zudem das alte Bild gelöscht werden. Daher liegt die Bildwiederholrate des im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgebauten Brailledisplays noch etwas hinter den Erwartungen zurück. In einer automatisierten Fertigung wäre es jedoch möglich, die Schlauchstücke zu verkürzen. Das wiederum würde dazu führen, dass sich die Wachsmenge reduziert, die bei einem Schaltvorgang schmelzen oder erstarren muss. Behält man gleichzeitig die elektrische Leistung bei, so ergibt sich eine kürzere Schaltzeit. Eine automatisierte Fertigung würde es nicht nur erlauben, deutlich kürzere

Schlauchstücke zuzuschneiden, auch die Präzision an den Schnittkanten würde sich erhöhen. Dadurch würden sich die Dichtungseigenschaften der Schnittkanten verbessern, was die Leckagen verhindern sollte, die in den Versuchsaufbauten wiederholt auftraten.

In Bezug auf die Auflösung und die Größe des Brailledisplays konnten die Wünsche der Teilnehmer der Online-Umfrage vollständig erfüllt werden. Die Auflösung des Brailledisplays wurde derjenigen der kommerziell erhältlichen großflächigen Brailledisplays nachempfunden. Somit ist sichergestellt, dass sowohl Schrift als auch Grafiken dargestellt werden können. Der Demonstrator, mit dem gezeigt wurde, dass sich die Technologie zur Herstellung eines großflächigen Brailledisplays eignet, besaß zwar nur 200 Antriebs Elemente. Durch einen modularen Aufbau des Gesamtsystems, in dem man mehrere dieser Chips mit 200 Antriebs Elementen zusammensetzt, kann man die verschiedenen gewünschten Größen jedoch mit geringem Aufwand anbieten. Das Design müsste hierzu nicht gravierend verändert werden.

Die Forderung nach dem geringen Gewicht der Antriebs Elemente ist mit diesem Aufbau ebenfalls erfüllt. Das Wachsvolumen eines kleinen Teelichtes genügt, um mehr als 790 Antriebs Elemente zu füllen. Damit wurde sogar die Anforderung, das Display solle so leicht sein wie ein Tablet-PC, entgegen den Erwartungen eingehalten. In einem vollständigen Brailledisplay müsste man zusätzlich zu den einzelnen Taxeln noch das Gewicht der Pumpe und der Batterien mit einrechnen. Der größte Posten hierbei sind die Batterien. Ein großer Vorteil des hier vorgeschlagenen Konzeptes besteht darin, dass das Gerät nur Strom verbraucht, um den Schaltzustand der Taxel zu verändern. Sobald das Wachs in den Schlauchstücken erkaltet ist, wird keine Energie mehr benötigt. Das Wachs stabilisiert die Taxel in diesem Zustand durch seine Form und sorgt dafür, dass sich der Schaltzustand nicht verändert. Die Zeit, die der Nutzer mit dem Lesen einer DIN-A4-Seite verbringt, ist deutlich länger als die zum Laden eines neuen Bildes benötigte Zeit. Das Display verbraucht deshalb nur wenig Energie. Dadurch muss das Batteriekonzept weniger Leistung zur Verfügung stellen, als dies bei Antriebs Elementen der Fall wäre, die bei einer Unterbrechung der Energiezufuhr in den Ausgangszustand zurückkehren. Dass Batterien mit geringerer Leistung in der Regel auch ein geringeres Gewicht besitzen, trägt ebenfalls zur Gewichtsreduktion des Gesamtsystems bei.

Schließlich bleibt zu prüfen, ob das hier entwickelte Brailledisplay sich auch am Markt positionieren könnte. Denn nur in diesem Fall besteht die Chance, dass sich eine Firma der Serienproduktion eines solchen Displays annimmt. Ein Produkt kann nur dann am Markt erfolgreich sein, wenn es genügend Kunden gibt, die bereit sind, den für dieses Produkt veranschlagten Preis zu bezahlen. Ein Brailledisplay müsste gemäß der Nutzerumfrage weniger als 3.000 € kosten, um sich am Markt durchsetzen zu können. Bei der Preisbildung kommen zu den Herstellungskosten noch betriebswirtschaftliche

Überlegungen hinzu. So müssen über den Verkauf von Produkten nicht nur die Material- und Herstellungskosten erwirtschaftet werden, sondern auch die Gehälter der Verwaltungs- und Vertriebsmitarbeiter. Die Schlüssel zum Abschätzen dieser Kosten hängen maßgeblich davon ab, wie die Firma aussieht, die das Produkt verkauft. Daher ist es an dieser Stelle nicht möglich, eine konkrete Vorhersage darüber zu treffen, welchen Preis der Endverbraucher für das entwickelte Display bezahlen müsste. Die Materialkosten der Taxel liegen jedoch nur bei zwei Cent pro Stück. Somit kosten 9.000 Taxel in etwa 180 €. Hinzu kommen Kosten für die Pumpe, deren Bauteile etwas mehr als 500 € gekostet haben, und die Elektronikbauteile zur Ansteuerung, deren Preis sich bei einer Serienfertigung in derselben Größenordnung bewegt. Geht man zur Deckung der Personal- und Betriebskosten in etwa von einer Verdreifachung des Materialpreises aus, so würde der Preis des Gesamtdisplays nur einen geringfügigen Betrag über den angestrebten 3.000 € liegen. Es hat somit das Potenzial, sich am Markt durchzusetzen und die Welt der taktilen Displays zu revolutionieren.