

# Machbarkeitsanalyse der scannergestützten Stimmzettelanalyse mittels VividForms und UniWahl4

Kristoffer Braun, Jurlind Budurushi und Melanie Volkamer

Security, Usability and Society, Fachbereich Informatik  
TU Darmstadt and Center for Advanced Security Research Darmstadt  
Hochschulstraße 10, 64289 Darmstadt  
vorname.nachname@cased.de

**Abstract:** Die große Anzahl der verschiedenen Wahlen bei den Hochschulwahlen an der TU Darmstadt führt zu einer Vielzahl von verschiedenen Stimmzetteln. Insgesamt gab es 2013 80 Stimmzettelvarianten, die zehn verschiedene Farben hatten. Bei den letzten Hochschulwahlen hat sich gezeigt, dass die Auszählungen bis in die frühen Morgenstunden dauern. Um die Auszählung der abgegebenen Stimmen zu beschleunigen, zieht die TU Darmstadt in Erwägung, auf eine scannergestützte Stimmzettelanalyse mittels VividForms und UniWahl4 umzustellen. Aus diesem Grund haben wir in dieser Arbeit untersucht, ob die scannergestützte Stimmzettelanalyse mittels VividForms und UniWahl4 für die TU Darmstadt die gewünschte Unterstützung bei einem automatischen Auszählungsvorgang erbringt und welche organisatorischen Maßnahmen zur Absicherung der Wahl erforderlich sind. Unsere Analyse zeigt, dass es aufgrund der Wahlordnung der TU Darmstadt nicht möglich ist, die Schwellwerte für die Erkennung einer Markierung so einzustellen, dass eine (weitgehend) automatische Auszählung durchgeführt werden kann. Schließlich sind organisatorische Maßnahmen, wie das Vier-Augen-Prinzip, strikt einzuhalten, da UniWahl4 entsprechende technische Sicherungsmechanismen fehlen.

## 1 Einleitung

An der Technischen Universität Darmstadt (TU Darmstadt) finden jährlich Hochschulwahlen statt, bei denen meist mehr als 32.000 Wahlberechtigte ihre Stimme abgeben können. Die Hochschulwahlen erstrecken sich über verschiedene Wahlen, wie z.B. zur Universitätsversammlung oder zum Studierendenparlament. Einige Wahlen finden nicht jedes Jahr oder nicht mit allen Wählergruppen (Studenten, Professoren, Wissenschaftliche und Administrativ-Technische Mitglieder) statt. Im Sommer 2013 werden an der TU Darmstadt die nächsten Hochschulwahlen stattfinden, bei denen die Mitglieder der Universitätsversammlung, der Fachbereichsräte, der gemeinsamen Kommissionen der Studienbereiche, des Studierendenparlaments und der Fachschaftsräte gewählt werden. Die Anzahl der verschiedenen Wahlen führt zu einer Vielzahl von verschiedenen Stimmzetteln. Es wird 61 verschiedene Stimmzettel (4 Statusgruppen mal 14 Gremien plus 5 Kommissionen der Studienbereiche) für die Hochschulwahlen sowie 19 verschiedene Stimmzettel für die Wahlen der Studierendenschaft geben. Insgesamt wird es daher 80 Stimmzettelvarian-

ten geben. Für die kommenden Hochschulwahlen werden diese zehn verschiedene Farben haben. Die Farbgebung dient der besseren Unterscheidbarkeit der verschiedenen Stimmzettel bei der Ausgabe im Wahllokal, bei der Stimmabgabe (Einwurf in die richtige Urne), und der Vorsortierung für die Auszählung. Es hat sich bei den letzten Wahlen gezeigt, dass es immer schwerer wird, Wahlhelfer zu rekrutieren und dass daher die Auszählungen bis in die frühen Morgenstunden dauern. Um die Auszählung der abgegebenen Stimmen zu beschleunigen, zieht die TU Darmstadt in Erwägung, auf eine scannergestützte Stimmzettelanalyse mittels VividForms<sup>1</sup> und UniWahl4<sup>2</sup> umzustellen. Diese wird hierzu bereits von einer Reihe von Universitäten in Deutschland genutzt<sup>3</sup>. Sie unterstützt das Aufsetzen und Verwalten von Wahlen sowie eine scannerbasierte Auswertung. Die Programme VividForms Reader und VividForms Scanstation werden von Electric Paper GmbH<sup>4</sup> vertrieben.

Das Ziel dieser Arbeit ist zu untersuchen, ob eine scannergestützte Stimmzettelanalyse mittels VividForms und UniWahl4 die gewünschte Unterstützung bei einem automatischen Auszählungsvorgang für die TU Darmstadt erbringt und welche organisatorischen Maßnahmen zur Absicherung der Wahl erforderlich sind. Dabei sollten die Überprüfungen aus einer früheren Analyse<sup>5</sup> für die neue Softwareversion wiederholt und ausgedehnt werden<sup>6</sup>.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel beschreiben wir die Randbedingungen, die vom Wahlleiter festgelegt wurden. Anschließend erläutern wir die relevanten Funktionen der scannergestützten Stimmzettelanalyse mittels VividForms und UniWahl4 und listen die verwendeten Hardware- und Softwarekomponenten auf.

### 2.1 Randbedingungen

Für unsere Tests wurden folgende Randbedingungen<sup>7</sup> festgelegt:

- Es soll buntes Papier verwendet und auf DIN A5 gedruckt werden<sup>8</sup>.
- Jede Art von Markierung ist erlaubt, solange der Wählerwillen eindeutig zu erken-

---

<sup>1</sup>VividForms wird von der TU Darmstadt bereits im Kontext der Lehrevaluation eingesetzt.

<sup>2</sup><http://www.uniwahl-soft.de/>

<sup>3</sup><http://www.uniwahl-soft.de/Download/Installationen-Tabelle-kurz.pdf> zeigt eine Liste der Universitäten, die eine Lizenz haben.

<sup>4</sup><http://www.electricpaper.de/>

<sup>5</sup>D. Demirel and R. Frankland and P. Darko and M. Volkamer (2011) Voting software to support election preparation, counting, and tallying In: CeDEM11 Proceedings, S. 287-300. Edition Donau-Universität Krems.

<sup>6</sup>Erfahrungsberichte zu UniWahl4: <http://www.uniwahl-soft.de/Meinungen/meinungen.html> (zuletzt abgerufen am 26.06.2013).

<sup>7</sup>Bestimmt durch die Wahlordnung, „[http://www.intern.tu-darmstadt.de/media/dez\\_vii/wahlamt\\_1/Wahlordnung2012.pdf](http://www.intern.tu-darmstadt.de/media/dez_vii/wahlamt_1/Wahlordnung2012.pdf)“ (zuletzt abgerufen am 28.06.2013), oder durch Vorgaben des IT-Sicherheitsbeauftragten.

<sup>8</sup>Laut Wahlordnung §19, Abs. 1, Nr. 1.

nen ist, z.B durch ein Kreuz, Häkchen oder ähnliches. Dabei soll ein vollständig geschwärztes Kästchen als Kreuz gewertet werden. Korrekturen sollen nicht möglich sein, d.h., wenn der Wähler sich vertan hat, wird sein alter Stimmzettel vernichtet, und er bekommt einen neuen<sup>9</sup>.

- Es wird aber nicht verlangt, dass ein bestimmter Stift für die Stimmabgabe verwendet wird. Stimmzettel, die nicht mit einem der Stifte in der Wahlkabine markiert werden, werden ebenfalls ausgewertet<sup>10</sup>.
- Die erforderliche Software würde auf einem vom Hochschulrechenzentrum (HRZ) speziell für die Wahl bereitgestellten Laptop installiert werden, der weder an das Internet noch an ein lokales Netzwerk angeschlossen ist und bis zum Abschluss der Wahl auch nicht angeschlossen wird.
- Beim Aufsetzen der Wahl mit UniWahl4 wäre der Wahlausschuss anwesend.
- Während der Auszählungsphase würde der Laptop nur direkt an den Scanner angeschlossen werden und würde „unter Beobachtung“ von zwei Mitgliedern des Wahlausschusses stehen.
- Im Rahmen der Auszählung wäre es denkbar zunächst alle Stimmzettel zu sichten und die Stimmzettel auszusortieren, auf denen sich außerhalb der vorgesehenen Kästchen Markierungen befinden<sup>11</sup>. Außerdem wäre es möglich, alle Stimmzettel, die mit einem bunten statt schwarzen Stift ausgefüllt wurden, auszusortieren. Des Weiteren wäre denkbar, alle Stimmzettel, die stark zerknittert sind, auszusortieren. Alle aussortierten Stimmzettel würden manuell ausgezählt<sup>12</sup>.

## 2.2 Überblick über die für diese Analyse wichtigen Komponenten

**FormularID und Barcode.** Beim Erstellen der Stimmzettel mit UniWahl4, bekommt jeder Wahlzettel<sup>13</sup> eine eindeutige ID, die sogenannte FormularID (FormID). Die FormID wird von UniWahl4 automatisch fortlaufend vergeben, kann aber manuell angepasst werden, und dient der automatischen Erkennung der Zugehörigkeit und Zuordnung eines eingescannten Stimmzettels zu einer bestimmten Wählergruppe<sup>14</sup>. Die FormID ist auf den Stimmzetteln als binär kodierter Barcode dargestellt, wobei ein schwarzes Kästchen 1 und ein weißes Kästchen 0 bedeutet. Der Barcode enthält außerdem die UmfrageID und die Seitennummer, wobei die UmfrageID bei UniWahl4 Software identisch zur FormID und die Seitennummer bei Stimmzetteln immer 1 ist. Daher besteht der Barcode entsprechend aus drei Zeilen, in denen die jeweiligen Dezimalzahlen binär kodiert dargestellt werden.

---

<sup>9</sup>Laut Wahlordnung §27, Abs. 1, c).

<sup>10</sup>Beschluss des Wahlvorstandes, damit Markierungen auf farbigen Stimmzetteln eindeutig zu erkennen sind.

<sup>11</sup>Diese Markierungen würden beim Scannen nicht berücksichtigt werden.

<sup>12</sup>Laut Wahlordnung §26, Abs. 4.

<sup>13</sup>Mit Wahlzettel sind alle Stimmzettel einer bestimmten Wahl gemeint.

<sup>14</sup>Die FormID ist identisch für alle Stimmzettel derselben Wählergruppe.



Abbildung 1: Barcode eines Stimmzettels

Bei dem in Abbildung 1 dargestellten Barcode ist sowohl die FormID (erste Zeile) als auch die UmfrageID (zweite Zeile) 5, binär also 101. In der dritten Zeile steht im siebten Bit von rechts die Seitennummer und die 3 Bits rechts davon sind jeweils die Paritätswerte von Seitennummer, FormID und UmfrageID. In diesem Fall ist der Paritätswert der Seitennummer und der der FormID sowie der UmfrageID 1. Paritätswerte sind schwarz (auf 1 gesetzt), wenn die Werte ungerade sind.

**Schwellwerte für den Füllungsgrad.** In den Einstellungen des VividForms Readers sind Schwellwerte anzugeben, ab welchem Füllungsgrad ein Kästchen als angekreuzt gewertet werden soll. Dabei wird zwischen vier Füllungsgrad-Bereichen unterschieden. Diese liegen innerhalb der festgelegten OMR<sup>15</sup>-Schwellwerte: Der erste Wert ist standardmäßig auf 15%, der zweite auf 25% und der dritte auf 90% gesetzt. Im Folgenden werden die einzelnen Bereiche erläutert:

- 0%-14%: Bei einem Füllungsgrad von 0% bis 14% werden Kästchen als nicht markiert ausgewertet.
- 15%-24%: Bei einem Füllungsgrad von 15% bis 24% kann eine Entscheidung durch den Wahlvorstand getroffen werden.

*Bemerkung:* Die Stimmzettel, auf denen der Füllungsgrad grenzwertig ist, werden zwar automatisch ausgewertet, aber auch als solche markiert<sup>16</sup>, damit der Wahlvorstand diese bei Bedarf nochmal kontrollieren kann. Diese Kontrolle muss manuell angestoßen werden. Hierbei muss der Wahlvorstand auf jeden einzelnen Link (Warnung) auf dem Auszählungsprotokoll klicken, um auf die eingescannte Bilddatei des Stimmzettels zu gelangen. An dieser Stelle kann dann entschieden werden, ähnlich wie bei Papierstimmzetteln, wie dieser Stimmzettel gewertet werden soll. In der UniWahl4 Software können zu diesem Zweck einzelne Stimmen manuell hinzugefügt oder abgezogen werden. Manuelle Änderung werden nicht in das Auszählungsprotokoll eingetragen.

- 25%-89%: Bei einem Füllungsgrad von 25% bis 89% wird das entsprechende Kästchen automatisch als markiert ausgewertet.
- 90%-100%: Bei einer Füllung von 90% bis 100% wird das Kästchen ebenfalls als nicht angekreuzt interpretiert. Im UniWahl4-Handbuch wird die Semantik des dritten Schwellwertbereiches so beschrieben, dass die Markierung eines Kandidaten

<sup>15</sup>OMR steht für Optical Mark Recognition

<sup>16</sup>Die Stimme wird erkannt, erzeugt aber eine Warnung im Auszählungsprotokoll.

durch eine vollständige Füllung rückgängig gemacht werden kann.<sup>17</sup>

Das Handbuch<sup>18</sup> der UniWahl4 Software empfiehlt, diese Einstellungen in Abhängigkeit von dem Kontrast zwischen Füllung des Kästchens und der Farbe des Papiers sowie je nach Größe der Kästchen<sup>19</sup> abzuändern. Daher haben wir die Schwellwerte entsprechend angepasst. Die ersten zwei Werte wurden nach dem Hinweis im Handbuch<sup>20</sup> angepasst: Minimal 10% und maximal 20%. Der dritte Schwellwert wurde auf 100% gesetzt, da laut unserer Randbedingungen ein vollständig geschwärztes Kästchen als Stimme gewertet werden soll. Diese Schwellwerte bezeichnen wir im weiteren Verlauf als Standardeinstellungen.

**Papierformate.** Die UniWahl4 Software unterstützt DIN A4, A5 und A3.

### 2.3 Software/Hardware Komponenten

Für die Tests wurden folgende Software/Hardware Komponenten verwendet:

- UniWahl4 Software Version 4.5.3-3299; diese integriert VividForms Reader Version 1.4 und VividForms Scanstation Version 2.0
- Lenovo T60, Intel(R) Core (TM) 2 CPU T7200 @2.00 GHz 2.00GHz, RAM 4.00GB
- Scanner: Ricoh Aficio MP 5000, Auflösung: max. 600 dpi (TWAIN: 1200 dpi), Originalformat: DIN A5-DIN A3, Schwarzweiß/Vollfarbe max. 61/31 Vorlagen/Minute

*Bemerkung:* Da die Geräte, welche in der eigentlichen Wahl eingesetzt werden würden, nicht zur Verfügung standen, wurde auf die am Fachgebiet verfügbaren zurückgegriffen.

## 3 Ermittlung geeigneter Schwellwerte für den Füllungsgrad

### 3.1 Vor-Tests zur Festlegung der Einstellungen

Um die richtigen Testeinstellungen festzulegen, wurden zunächst eine Reihe von Vor-Tests durchgeführt, die hier beschrieben werden:

**Papierformat.** Bei diesem Test sollte herausgefunden werden, ob es Unterschiede zwischen dem von den Randbedingungen geforderten DIN A5 und dem zur Verfügung stehenden DIN A4 gibt. Für diesen Test haben wir einige Stimmzettel auf DIN A4 Papier

---

<sup>17</sup>Dadurch ist es nicht erforderlich, dass der Wähler sich einen neuen Stimmzettel geben lässt, wenn er das Kreuz an die falsche Stelle setzt sondern er kann dieses Kreuz revidieren, in dem er das Feld ganz ausmalt.

<sup>18</sup><http://www.uniwahl-soft.de/Download/manual.pdf>

<sup>19</sup>Die Größe der Kästchen auf einem Stimmzettel hängt von der Anzahl der Kandidaten ab.

<sup>20</sup><http://www.uniwahl-soft.de/Download/manual.pdf>, siehe Seite 113.

ausgedruckt. Die selben Stimmzettel wurden durch Anpassung der Einstellungen der Uni-Wahl4 Software auf DIN A5 verkleinert und auf DIN A4 Papier gedruckt. Bei diesem Test gab es insgesamt keine Auffälligkeiten. Sowohl das Scannen als auch die Erkennung der Kreuze war problemlos möglich. Es hat sich herausgestellt, dass die Größe des Barcodes und der Kästchen, zwei der wichtigsten Merkmale eines Stimmzettels, bei beiden Formaten exakt gleich sind. Daraus kann man schließen, dass das Testen mit DIN A5, die auf DIN A4 gedruckt sind, keine Auswirkung auf die Testergebnisse hat.

**Papierfarbe.** Die Randbedingungen vom Wahlleiter setzen voraus, dass bei den Tests farbiges Papier für die Stimmzettel verwendet wird, da dieses auch später bei den Hochschulwahlen zum Einsatz kommen würde. Dadurch, dass die Menge der vom Wahlamt zur Verfügung gestellten farbigen DIN A4 Papiere sehr beschränkt war, haben wir bei den eigentlichen Tests nur weißes Papier verwendet. Dennoch wurde getestet, in wie weit sich weißes und farbiges Papier beim Scannen und Auswerten unterschiedlich verhalten. Wir haben dazu folgende Farben verwendet: hell- und dunkelblau, hellgrün, gelb, orange und pink. Dabei wurde zu Beginn ein Vergleich zwischen den verschiedenen Blindfarbenfilterungen<sup>21</sup> des Scanners gemacht. Mit der Scanner-Blindfarbenfilterung „Pastell Farben“ wurden die qualitativ besten Ergebnisse erzielt. Aus diesem Grund wurde für den Vergleich der Scannergebnisse von weißem und farbigem Papier diese Scanner-Einstellung verwendet. Der Vergleich der Ergebnisse eines Scans mit einem weißen und einem farbigen Papiers ergab einen durchschnittlichen Unterschied von ein bis zwei Prozent beim Füllungsgrad bei gleicher Markierung. Diese Erkenntnis wird bei der Festsetzung der Schwellwerte für unsere eigentlichen Tests berücksichtigt.

**Helligkeitsstufe des Scanners.** Dieser Test wurde nur mit weißem Papier durchgeführt<sup>22</sup>. Ziel ist es herauszufinden, welche Helligkeitseinstellung des Scanners die qualitativ besten Ergebnisse erzielt. In den Einstellungen des verwendeten Scanners kann man entweder die Helligkeitsstufe „automatisch“ auswählen oder die Helligkeitsstufe auf einer Skala von -3 bis +3 einstellen. Da bei einer Wahl verschiedene Typen von Stiften verwendet werden, wurde dieser Test mit einem Bleistift, einem Filzstift und einem Kugelschreiber durchgeführt. Bei dem Bleistift handelt es sich um einen Staedtler Mars micro 0.33mm, der Filzstift ist ein Staedtler pigment liner 0.1mm und der Kugelschreiber ein schwarzer Schneider Office Kugelschreiber. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse des Füllungsgrads für den abgebildeten Stimmzettel und verschiedene Helligkeitsgrade dargestellt.

Bei diesem Test stellte sich heraus, dass, bei einer geringen Helligkeitsstufe das Kreuz des Bleistifts nicht immer erkannt wurde und bei einer hohen Helligkeitsstufe teilweise leere Kästchen als markiert angezeigt wurden. Nach mehreren Durchläufen wurde für die weiteren Tests die Helligkeitseinstellung 0 ausgewählt, da damit die qualitativ besten Ergebnisse erzielt wurden. Es ist während dieser Tests außerdem aufgefallen, dass Kreuze nicht immer mit dem gleichen Prozentsatz (Grad der Füllung) erkannt werden. Es gibt

<sup>21</sup> Beim Scannen von farbigem Papier mit dieser Einstellung wird die Farbe des Papiers nicht mitgelesen, und das Ergebnis ist ein Stimmzettel mit weißem Hintergrund.

<sup>22</sup> Laut dem UniWahl4-Handbuch (<http://www.uniwahl-soft.de/Download/manual.pdf>, siehe Seite 115.) soll man vor einer Wahl die Einstellung des Scanners testen.

Markiert durch Bleistift

Legende Scannerhelligkeit: A: Automatische Helligkeit; -3: Sehr hell  
0: Normal; +3: Sehr dunkel

**Stimmzettel für die Hochschulwahlen im Sommersemester 2011 zur  
Universitätsversammlung / Gruppe II - Studierende**

Es findet Listenwahl statt. Sie können höchstens 1 Liste ankreuzen.

Markieren Sie so:  Bitte verwenden Sie einen Kugelschreiber oder Filzstift. Dieser Stimmzettel wird maschinell erfasst.

**Liste 1: "Fachwerk"** A: 9%; -3: 5%; 0: 15%; +3: 30%;  
 [Redacted]  
 [Redacted] Füllungsgrad

**Liste 2: "Campusgrüne"** A: 22%; -3: 10%; 0: 27%; +3: 39%;  
 [Redacted]  
 [Redacted]

Abbildung 2: Stimmzettel (Helligkeit)

durchschnittlich eine Abweichung von etwa ( $\pm$ ) 2%. Außerdem werden Kugelschreiber und Filzstift generell durchschnittlich 10% besser als der Bleistift erkannt.

Diese Tests wurden nur für das weiße Papier durchgeführt. Vor einem Einsatz bei einer Wahl wäre es erforderlich die gleichen Tests für die anderen Farben durchzuführen, um festzustellen, ob dort die gleiche Helligkeitsstufe empfehlenswert ist.

**Einstellungen zum Durchführen der Tests.** Die eigentlichen Tests wurden nur mit weißem DIN A4 Papier durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen unserer Vor-Tests, führen wir im Folgenden die Tests nur noch mit der Scanner-Helligkeitseinstellung 0 durch. Die Schwellwerte des VividForms Readers sind, wie in Abschnitt 2.2 festgelegt: Der erste bei 10%, der zweite bei 20% und der dritte bei 100%.

### 3.2 Tests mit verschiedenen Markierungen und schwarzen Stiften

Das Ziel dieser Tests ist es herauszufinden, ob alle verschiedenen Markierungen mit unterschiedlichen schwarzen Stiften, die manuell auch als Stimmen<sup>23</sup> gewertet werden, auch bei den Standardeinstellungen als solche gewertet werden.

Bei diesen drei Tests wurden alle Kästchen auf verschiedene Arten angekreuzt. Diese Stimmzettel wären für die Wahl aufgrund der Anzahl der Kreuze auf einem Stimmzettel ungültig, aber jedes einzelne Kreuz auf den Stimmzetteln ist so gesetzt, dass es bei einer Wahl aus unserer Sicht auch als Kreuz interpretiert werden sollte.

1. Schwarzer Kugelschreiber: Es wurden sechs Kästchen auf verschiedene Arten angekreuzt. Alle sechs Kreuze wurden erkannt mit 9%, 45%, 46%, 20%, 14% und 85% Füllungsgrad. Der Stimmzettel wurde mit der richtigen FormID erfasst. Es wurden insgesamt 5 Kreuze erkannt und automatisch ausgewertet, nämlich mit Füllungsgrad

<sup>23</sup>Korrekt angekreuzter/ausgewählter Kandidat.

45%, 46%, 20%, 14% und 85%. Für das Kreuz mit dem Füllungsgrad 14%, welches zwischen dem ersten und zweiten OMR-Schwellwert liegt, wurde zusätzlich eine Warnung im Auszählungsprotokoll angezeigt. Es gab ein richtig angekreuztes Kästchen, nämlich mit Füllungsgrad 9%, das nicht automatisch ausgewertet wurde, weil der Füllungsgrad außerhalb des unteren OMR-Schwellwertbereiches lag. Aus diesem Grund wurde für dieses Kästchen keine Warnung im Auszählungsprotokoll gespeichert. Anhand dieses Protokolls ist nicht erkennbar, welches Kästchen ungültig gewertet wird.

2. Bleistift: Es wurden sechs Kästchen auf verschiedene Arten angekreuzt. Alle sechs Kreuze wurden erkannt mit 15%, 27%, 26%, 13%, 6% und 82% Füllungsgrad. Der Stimmzettel wurde mit der richtigen FormID erfasst. Es wurden insgesamt 5 Kreuze erkannt und automatisch ausgewertet, nämlich mit Füllungsgrad 15%, 27%, 26%, 13% und 82%. Für zwei Kreuze, nämlich mit den Füllungsgraden 15% und 13%, welche zwischen dem ersten und zweiten OMR-Schwellwert liegen, wurde zusätzlich jeweils eine Warnung im Auszählungsprotokoll angezeigt. Es gab ein richtig angekreuztes Kästchen, nämlich mit Füllungsgrad 6%, das nicht automatisch ausgewertet wurde, weil der Füllungsgrad außerhalb des unteren OMR-Schwellwertbereiches lag. Aus diesem Grund wurde für dieses Kästchen keine Warnung im Auszählungsprotokoll gespeichert. Anhand dieses Protokolls ist nicht erkennbar, welches Kästchen ungültig gewertet wird.
3. Schwarzer Filzstift: Es wurden sechs Kästchen auf verschiedene Arten angekreuzt. Alle sechs Kreuze wurden erkannt mit 24%, 36%, 30%, 11%, 7%, und 82% Füllungsgrad. Der Stimmzettel wurde mit der richtigen FormID erfasst. Es wurden insgesamt 5 Kreuze erkannt und automatisch ausgewertet, nämlich mit Füllungsgrad 24%, 36%, 30%, 11% und 82%. Für das Kreuz mit dem Füllungsgrad 11%, welches zwischen dem ersten und zweiten OMR-Schwellwert liegt, wurde zusätzlich eine Warnung im Auszählungsprotokoll angezeigt. Es gab ein richtig angekreuztes Kästchen, nämlich mit Füllungsgrad 7%, das nicht automatisch ausgewertet wurde, weil der Füllungsgrad außerhalb des unteren OMR-Schwellwertbereiches lag. Aus diesem Grund wurde für dieses Kästchen keine Warnung im Auszählungsprotokoll gespeichert. Anhand dieses Protokolls ist nicht erkennbar, welches Kästchen ungültig gewertet wird.

### 3.3 Anpassung der Schwellwerteinstellungen

Basierend auf den Ergebnissen von Abschnitt 3.1 und 3.2 werden in diesem Abschnitt Überlegungen zur Anpassung der Schwellwerte diskutiert sowie entsprechende Tests erläutert. Ziel ist es zu untersuchen, ob die Standardeinstellungen des VividForms Readers angepasst werden können, sodass nur korrekt angekreuzte Kästchen (und keine leeren) als solche erkannt werden und möglichst wenig korrekt angekreuzte Kästchen manuell ausgewertet werden müssen (weil diese im Grenzbereich liegen). Für diesen Test wurde ein Bleistift verwendet, da dieser bei den Tests in Abschnitt 3.2 den niedrigsten Füllungsgrad

aufweist und zwar durchschnittlich 6% im Vergleich zum schwarzen Filzstift mit 7% und zum schwarzen Kugelschreiber mit 9%.

**Festlegung des ersten Schwellwerts.** Aufgrund der Erkenntnisse von Abschnitt 3.1, dass es einen maximalen Unterschied von 2% zwischen farbigem<sup>24</sup> und weißem Papier gibt und die durchschnittliche Abweichung beim mehrfachen Scannen des selben Stimmzettels etwa ( $\pm$ ) 2% beträgt, sollte der erste (minimale) Schwellwert des VividForms Readers auf 2% festgelegt werden. Auf diese Weise kann dieser alle (auch die durch den Bleistift) markierten Kästchen zuverlässig automatisch erkennen. Dieser Wert ergibt sich aus folgender Berechnung: 6% (Füllungsgrad Bleistift) + ( $\pm$ ) 2% (Abweichung bei der Papierfarbe) + ( $\pm$ ) 2% (Abweichung beim Scannen). Das Ergebnis beläuft sich dann entweder auf 2% oder auf 10%. Damit alle Kreuze erkannt werden, wurde für alle weiteren Tests der niedrigere Wert gewählt.

**Unabsichtliche Markierungen.** Bei diesem Test wurde geprüft, bei welcher Art von Markierung der VividForms Reader reagiert, und mit welchem Füllungsgrad diese Markierung erkannt wird. Hintergrund für diese Test ist die Tatsache, dass 2% als unterer Schwellwert dazu führen könnte, dass auch Kästchen ohne (wirkliche) Markierung als Kästchen mit Markierung interpretiert werden. Bei diesem Test stellte sich heraus, dass der VividForms Reader ab zwei Punkten (Bleistift wurde ungeschickt fallengelassen), die mit dem Bleistift gemacht wurden, reagiert. Diese werden mit einem Füllungsgrad von 4% bis 5% erkannt. Wenn der erste Schwellwert auf 2% gesetzt ist, liegen diese Stimmen im Bereich der automatisch ausgewerteten Stimmzettel. Sie würden aber zusätzlich mit einer Warnung im Auszählungsprotokoll versehen werden, d.h. der Wahlvorstand hat hier die Möglichkeit, ähnlich wie bei den Papierstimmzetteln, manuell zu überprüfen, ob es sich um ein unabsichtlich oder absichtlich angekreuztes Kästchen handelt. Diese Einstellung führt also nicht dazu, dass solche Markierungen voll automatisch als Kreuz interpretiert werden; sie führt aber dazu, dass eventuell viele Stimmzettel manuell ausgewertet werden müssen.

## 4 Angriffe

In diesem Abschnitt beschreiben wir einige Angriffe, die es ermöglichen, das Wahlergebnis zu manipulieren. Dabei, sind Angriffe auf alle Komponenten theoretisch denkbar, z.B auf Stimmzettel, auf die Dateien, auf die UniWahl4 Software selber, auf Hardware (Scanner/PC). Allerdings sind Angriffe auf Hardware (Scanner/PC) und die Manipulation der authentischen UniWahl4 Software für eine Universitätswahl bzgl. Zeit und Kosten zu aufwendig und wurden daher nicht weiter betrachtet.

Die in dieser Arbeit betrachteten Angriffe werden in drei Kategorien eingeteilt: Die erste Kategorie beschreibt Angriffe, die durch direkte Manipulationen auf dem Stimmzettel erfolgen. Die zweite Kategorie stellt Angriffe dar, die durch die Manipulation der von UniWahl4 verwendeten XML-Dateien erfolgen. Die dritte Kategorie beschreibt Angriffe, die manuell in der UniWahl4 Software selbst durchgeführt werden.

---

<sup>24</sup>Denkbar wäre hier auch für jede Farbe die Scannwerte neu im System einzutragen. Da wir dies für zu fehleranfällig und aufwendig halten, haben wir diese Option nicht weiter betrachtet.

## 4.1 Manipulation des Stimmzettels durch Veränderung des Barcodes

Bei diesem Angriff werden die auf dem Stimmzettel gesetzten Markierungen vorgenommen, um die eigene Stimme für einen fremden Stimmzettel abzugeben. Dieser Angriff kann in zwei Klassen unterteilt werden, die in den folgenden Unterabschnitten behandelt werden: Angriff wird auf Stimmzetteln, die die gleiche Anzahl an Kandidaten aufweisen, durchgeführt. Angriff wird auf Stimmzetteln, die eine unterschiedliche Anzahl an Kandidaten aufweisen, durchgeführt.

**Stimmzettel mit gleicher Anzahl an Kandidaten.** Um diesen Angriff auf den Barcode durchführen zu können, muss der Barcode des eigenen Stimmzettels in den des fremden Stimmzettels abgeändert werden, zum Beispiel durch Schwärzungen oder dem Abkleben bereits vorhandener Schwärzungen. Auf Abbildung 3 erkennt man, wie der eigene Barcode (b) durch Schwärzung (c) zu dem Barcode eines fremden Stimmzettels (a) geändert werden kann. Aus diesem Grund muss dem Angreifer der Barcode bzw. die FormID des fremden Stimmzettels und die Reihenfolge der Kandidaten bekannt sein<sup>25</sup>. Während der Aussortierung der Stimmzettel kann die Schwärzung nicht erkannt werden. Der Angreifer ist wahlberechtigt. Es gibt zwei Stimmzettel mit gleicher Anzahl an Kandidaten. Dabei besitzen alle Kästchen sowohl beim eigenen Stimmzettel<sub>1</sub> als auch beim fremden Stimmzettel<sub>2</sub> die gleiche Position. Der Angreifer bekommt Stimmzettel<sub>1</sub>, um seine Stimme abzugeben. Er verändert den Barcode von seinem eigenen Stimmzettel<sub>1</sub> zum Barcode des fremden Stimmzettels<sub>2</sub> und kreuzt das Kästchen auf derselben Höhe an, auf der der gewünschte Kandidat auf dem Stimmzettel<sub>2</sub> aufgelistet ist. Dadurch kann der Angreifer seine Stimme für ein anderes Gremium / andere Gruppe abgeben<sup>26</sup>. Dieser Angriff wird von UniWahl4 nicht erkannt, und während der Auszählung tritt keine Fehlermeldung auf.

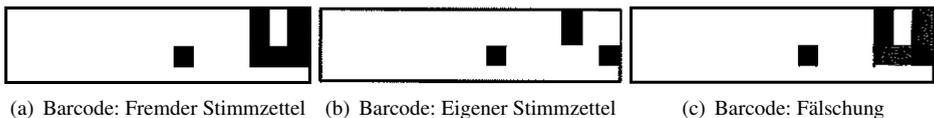


Abbildung 3: Manipulation des Barcodes

**Stimmzettel mit unterschiedlicher Anzahl an Kandidaten.** Dieser Angriff erfordert die gleichen Voraussetzungen wie der davor beschriebene Angriff und wird auch analog dazu durchgeführt. Aus diesem Grund gilt auch hier Abbildung 3. Dadurch, dass die Stimmzettel eine unterschiedliche Anzahl an Kandidaten haben, befinden sich die Kästchen der beiden Stimmzettel nicht auf gleicher Höhe. Bei diesem Angriff unterscheidet man zwei Fälle: Bei dem ersten Fall sind auf der Fälschung mehr Kandidaten als auf dem Original. Diese Art von Angriff wird von UniWahl4 Software nicht erkannt, und während der Auszählung tritt keine Fehlermeldung auf. Bei dem zweiten Fall sind auf

<sup>25</sup>Der Angreifer kann die FormID und die Reihenfolge der Kandidaten vom fremden Stimmzettel entweder durch Nachfragen oder durch Wahlbeobachtung während der Stimmzettelerzeugung herausfinden.

<sup>26</sup>Dabei nimmt der Angreifer den Verlust seiner Stimme für sein Gremium / seine Gruppe in Kauf.

der Fälschung weniger Kandidaten als auf dem Original. Fehlende Kästchen können zwar mit Kugelschreiber eingezeichnet werden, jedoch kommt es beim Einlesen dieses Stimmzettels zu einer Fehlermeldung, siehe Abbildung 4. Diese Fehlermeldung muss mit OK bestätigt werden. Unabhängig von dieser Fehlermeldung wird aber eine neue „Stimme“-Datei im Ordner „Stimmen“ erzeugt. Entsprechend wird diese auch bei der Auszählung berücksichtigt, d.h. wenn ein Kästchen an der richtigen Stelle ist, wird dieses automatisch ausgewertet, ansonsten nicht. Im Auszählungsprotokoll erscheint der Eintrag: Fehler: A1000: Ankreuzfeld konnte nicht gefunden werden, siehe Abbildung 5.

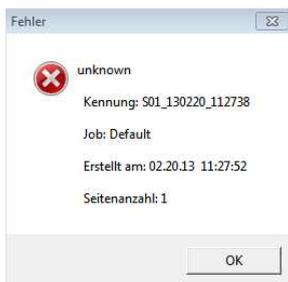


Abbildung 4: Fehlermeldung

[Stimmzettel Nr. 1: Fehler: A1000: Ankreuzfeld konnte nicht gefunden werden. >>> Liste: 1, Kandidat: 6](#)

Abbildung 5: Fehler

Entsprechend ist hier eine manuelle Prüfung aller dieser Stimmzettel erforderlich. Diese Prüfung erfordert die gleichen Schritte, die unternommen werden, wenn der Füllungsgrad eines Stimmzettels zwischen dem ersten und zweiten OMR-Schwellwert liegt. Diese Schritte werden in Abschnitt 2.2 genauer beschrieben.

Es ist bei Hochschulwahlen der TU Darmstadt sehr wahrscheinlich, dass bei dem Stimmzettel des Angreifers, der Barcode leicht in den des fremden Stimmzettels abgeändert werden kann, und dass die Anzahl der Kandidaten übereinstimmt. Dies folgt aus der Tatsache, dass einige Wähler bei den Hochschulwahlen der TU Darmstadt bei mehreren Wahlen gleichzeitig eine Stimme abgeben dürfen. Promotionsstudenten können zum Beispiel sowohl als Studenten als auch als wissenschaftliche Mitarbeiter an der Wahl teilnehmen.

## 4.2 Manipulation der XML-Dateien

In der UniWahl4 Software existieren zwei unterschiedliche Arten von XML-Dateien. Einerseits wird bei der Erstellung eines Stimmzettels in UniWahl4 eine XML-Datei für diesen Stimmzetteltyp angelegt, andererseits wird für jeden einscannten Stimmzettel eine XML-Datei erzeugt. Diese beim Scannen erzeugten XML-Dateien werden während der automatischen Auszählung von dem VividForms Reader ausgelesen und ausgewertet. Entsprechend sind die im Folgenden diskutierten beiden Angriffe denkbar:

**Manipulation der beim Erstellen der Stimmzettel angelegten XML-Dateien.** Bei diesem Angriff werden die XML-Dateien, die von der UniWahl4 Software bei der Erstellung der Stimmzettel angelegt werden, verändert. Dazu müsste der Angreifer in der Zeit nach der Erstellung der Stimmzettel und vor der Auszählung Zugriff auf den Laptop haben. Dieser Angriff wurde betrachtet, da uns explizit keine entsprechenden Maßnahmen genannt wurden, die interne oder externe davon abhalten, auf den Laptop zuzugreifen.

Der Angriff würde folgendermaßen ablaufen: Jede angelegte XML-Datei beinhaltet eine „questionid“ für jeden auf dem Stimmzettel aufgelisteten Kandidaten. Die „questionid“ eines Kandidaten wird wie folgt berechnet:  $questionid = ListenNr * 1000 + KandidatNr$ . Diese Art von Angriff wird von UniWahl4 nicht erkannt, und während der Auszählung tritt keine Fehlermeldung auf.

Ein Angreifer muss Zugang zu den XML-Dateien haben, d.h. Zugang zum Rechner, der zur automatischen Auszählung verwendet wird. Dieser Angriff muss vor dem Scannen der Stimmzettel durchgeführt werden. Die angelegten XML-Dateien werden nicht vor dem Scannen des Stimmzettels mit den gesicherten Kopien verglichen.

Es gibt einen Stimmzettel mit zwei Kandidaten und entsprechend die angelegte XML-Datei. Der Angreifer tauscht die „questionid“ in der entsprechend XML-Datei, wodurch sich die interne Reihenfolge der Kandidaten verändert. Hat ein Wähler ein Kreuz für den an der ersten Stelle auf dem Stimmzettel aufgelisteten Kandidaten gesetzt und der Angreifer hat die questionsids der ersten beiden Kandidaten vertauscht, so wird dieses Kreuz nicht für den ersten, sondern für den an der zweiten Stelle auf dem Stimmzettel gelisteten Kandidaten gezählt.

**Manipulation der beim Scannen erzeugten XML-Dateien.** Bei diesem Angriff werden die XML-Dateien, die von UniWahl4 während des Einscannens der Stimmzettel erzeugt werden, verändert. Dazu müsste der Angreifer in der Zeit nach dem Scannen und vor der eigentlichen Auszählung Zugriff auf den Laptop haben. Dieser Angriff wurde betrachtet, auch wenn die Vorgabe war, dass es eine Vier-Augen-Prinzip Sicherung während der Auszählung gibt, um aufzuzeigen wie wichtig diese ist und dass diese nicht etwa wegen einer Raucherpause ausgesetzt werden sollte.

Der Angriff würde folgendermaßen ablaufen: Jede erzeugte XML-Datei beinhaltet einen Wert „value“ für jedes Kästchen des Stimmzettels. Wenn das Kästchen als angekreuzt erkannt wurde, ist dieser Wert 1, ansonsten 0. Diese Art von Angriff wird von UniWahl4 nicht erkannt, und während der Auszählung tritt keine Fehlermeldung auf.

Ein Angreifer muss Zugang zu den XML-Dateien haben, d.h. Zugang zum Rechner, der zur automatischen Auszählung verwendet wird. Dieser Angriff wird nach dem Scannen der Stimmzettel und vor der automatischen Auszählung durchgeführt.

Es gibt einen Stimmzettel mit zwei Kandidaten und entsprechend die erzeugte XML-Datei. Die erzeugte XML-Datei hat „value = 1“ für Kandidat<sub>1</sub> und „value = 0“ für Kandidat<sub>2</sub>. Der Angreifer tauscht die Werte der „values“. Dadurch wird diese Stimme nicht für Kandidat<sub>1</sub>, sondern für Kandidat<sub>2</sub> gezählt, da während der automatischen Auszählung durch die UniWahl4 nur auf die „values“ geachtet wird.

Hierbei ist zu beachten, dass zwar auch bei traditionellen Wahlen eine Manipulation denkbar ist, wenn das Vier-Augenprinzip (wegen Raucherpause) verletzt ist, hier aber die in der Zeit manuell vorzunehmenden Manipulationen sehr eingeschränkt sind während die eingescannten XML Dateien automatisch (z.B. durch entsprechende Software auf einem USB Stick) verändert werden können. Daher ist die Einhaltung des Vier-Augen-Prinzips hier noch wichtiger als bei traditionellen Wahlen.

### **4.3 Manuelle Veränderung der Ergebnisse**

Bei diesem Angriff wird das Ergebnis nachträglich in UniWahl4 bearbeitet. Dazu müsste der Angreifer in der Zeit nach der eigentlichen Auszählung Zugriff auf den Laptop haben. Dieser Angriff wurde betrachtet, auch wenn auch hier die Vorgabe war, dass es eine Vier-Augen-Prinzip Sicherung während der Auszählung gibt, um aufzuzeigen wie wichtig auch hier diese organisatorische Sicherung ist und, dass diese nicht etwa wegen einer Raucherpause ausgesetzt werden sollte.

Der Angriff würde folgendermaßen ablaufen: Hierbei wird in UniWahl4 über die gegebenen Funktionen die Stimmenzahl nach dem Einscannen und Lesen eines Stimmzettels manuell auf einen beliebigen, gültigen Wert geändert. Diese manuelle Änderung wird von UniWahl4 nicht protokolliert, kann also im Nachhinein nicht nachvollzogen oder kontrolliert werden.

## **5 Zusammenfassung und mögliche Gegenmaßnahmen zu den identifizierten Problemen**

In diesem Abschnitt fassen wir die Ergebnisse unserer Analyse zusammen und gehen nochmal auf die durch die Untersuchungen der scannergestützten Stimmzettelanalyse mittels VividForms und UniWahl4 identifizierten Probleme im Kontext von Hochschulwahlen der TU Darmstadt ein. Anschließend schlagen wir Gegenmaßnahmen vor, mit denen diesen Problemen entgegengewirkt werden kann.

Die identifizierten kritischen Probleme sind:

- Anpassung der Schwellwerte in VividForms, um auch Kreuze mit Bleistift zu erkennen, hat die Folge, dass eine große Anzahl an Stimmzetteln manuell geprüft werden muss.
- Veränderungen der Stimmzettel und der XML-Dateien werden in einigen Fällen vom System nicht automatisch erkannt, wodurch unbemerkt das Ergebnis verändert werden kann.

Diese kritischen Probleme werden in den folgenden Unterabschnitten behandelt.

## 5.1 Anpassung der Schwellwerte für eine vollständig automatische Auszählung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es keinen idealen Kompromiss für die Schwellwerteinstellungen des VividForms Readers gibt, sodass man in der Lage ist, alle eingescannten Stimmzettel automatisch auswerten zu lassen, insbesondere, da die Verwendung eines Bleistifts von der Wahlordnung der TU Darmstadt nicht ausgeschlossen wird. Da es für den Wahlvorstand nicht immer möglich ist zu erkennen, welche Stimmzettel automatisch ausgewertet werden können, ist eine sinnvolle Vorsortierung nicht möglich. Aus diesem Grund können wir hierfür keine geeignete Lösung vorschlagen. Nichtsdestotrotz, ist es in Abhängigkeit von der entsprechenden Wahlordnung einer Universität möglich, dass die scannergestützten Stimmzettelanalyse mittels VividForms und UniWahl4 bei anderen Universitäten eingesetzt werden kann, da sich durch strengere Vorgaben ggf. ein geeigneter Schwellwert bestimmen lässt.

## 5.2 Veränderung der Stimmzettel, der XML-Dateien und manuelle Manipulation

Die identifizierten Angriffe haben gezeigt, dass UniWahl4 keinen ausreichenden technischen Schutz vor Manipulationen der Wahlergebnisse bietet. Weitere Kontrollmöglichkeiten für die Öffentlichkeit, wie bei herkömmlichen Wahlen z.B das versiegeln der Urne, sodass die Wähler/Öffentlichkeit nicht nur vertrauen müssen, sondern auch die Möglichkeit haben, an dieser Stelle zu kontrollieren, sind nicht vorhanden. Im Folgen werden für die einzelnen Angriffe Gegenmaßnahmen aufgezeigt.

**Gegenmaßnahmen, um Veränderung am Stimmzettel (Barcode) zu erkennen.** Angriffe durch Manipulation der Stimmzettel<sup>27</sup> können durch organisatorische Maßnahmen entdeckt werden, sofern man die Stimmzettel vor der Auszählung mit UniWahl4 nach Wahlbereichen sortiert. Als erstes würde der Wahlvorstand die Stimmzettel einer Wählergruppe nach Veränderungen des Barcodes untersuchen. Diese Stimmzettel werden für ungültig erklärt.<sup>28</sup> Anschließend würde der Wahlvorstand alle Stimmzettel einer Wählergruppe einscannen und überprüfen, Stimmzettel zu einer falschen Wählergruppe zugeordnet wurden (weil bei der Vorkontrolle etwas übersehen wurde). Bei einer falschen Zuordnung, müsste der Wahlvorstand alle Stimmzettel nochmal genauer nach Unregelmäßigkeiten überprüfen und diese Stimmzettel für ungültig<sup>29</sup> erklären. Diese Überprüfung muss manuell durchgeführt werden, da im Auszählungsprotokoll von UniWahl4 die eingescannten Stimmzettel nicht nach Wählergruppen unterschieden werden. Diese Maßnahme ist zwar denkbar, aber sie erfordert einen großen Zeitaufwand.

**Gegenmaßnahmen, um Veränderung der beim erstellen der Stimmzettel angelegten XML-Dateien, zu erkennen.** Hierzu könnten am Ende der Erstellung aller Wahlzettel in der Wahlvorbereitungsphase Kopien erstellt werden. Diese Kopien würde von unterschiedlichen Personen sicher aufbewahrt werden. Vor dem eigentlichen Scanvorgang kann dann

---

<sup>27</sup> Manipulationen an dem Barcode des Stimmzettels.

<sup>28</sup> Laut Wahlordnung nach §27, Abs. 1, d).

<sup>29</sup> Laut Wahlordnung nach §27, Abs. 1, d).

ein Vergleich mit den Kopien durchgeführt werden. Dadurch wäre eine Art öffentliche Kontrolle möglich.

### **5.3 Weitere Anmerkungen für den Einsatz an der TU Darmstadt**

Der Hauptgrund für die Überlegungen der TU Darmstadt war, dass der Auszählvorgang bei den letzten Hochschulwahlen sehr lange dauerte und es immer schwerer wird, Wahlhelfer zu finden. Aus diesem Grund soll ein System verwendet werden, das den Ablauf stark beschleunigt. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die scannergestützten Stimmzettelanalyse mittels VividForms und UniWahl4 einige Schwächen aufweist: Anpassung der Schwellwerte, Veränderung der Stimmzettel (Barcode) und Veränderung der beim Erstellen der Stimmzettel angelegten XML-Dateien. Die zwei letzten Schwächen können jedoch durch aufwendige organisatorische Maßnahmen verhindert werden und stellen daher kein fundamentales Problem dar. Die Schwierigkeiten, die sich durch die Anpassung der Schwellwerte ergeben, können sich auf die Beschleunigung des Auszählvorganges negativ auswirken. Zusätzlich werden Veränderungen des Ergebnisses, z.B durch manuell versehentliche Änderungen am GUI der UniWahl4, nicht protokolliert, sodass im Nachhinein nicht nachvollzogen oder kontrolliert werden kann. Aus diesem Grund haben wir der TU Darmstadt nicht empfohlen eine scannergestützte Stimmzettelanalyse mittels VividForms und UniWahl4 einzusetzen. Für die Wahl 2013 ist die TU Darmstadt unseren Empfehlungen gefolgt und hat ohne Scannerlösung ausgezählt.

### **5.4 Acknowledgement**

Die Autoren möchten sich bei Herrn Prof. Frens Peters bedanken, der der TU Darmstadt kostenlos eine Lizenz für die scannergestützte Stimmzettelanalyse mittels VividForms und UniWahl4 zur Verfügung gestellt hat, um die Eignung für Hochschulwahlen an der TU Darmstadt zu evaluieren. Daher tut es den Autoren leid, dass wir zu dem Ergebnis gekommen sind, dass wir - ohne eine Änderung der Wahlordnung - die scannergestützten Stimmzettelanalyse mittels VividForms und UniWahl4 an der TU Darmstadt nicht empfehlen können. Die Autoren möchten außerdem dem Wahlleiter der TU Darmstadt danken, der uns immer wieder Fragen zu den Hochschulwahlen und der Wahlordnung beantwortet hat. Diese Arbeit entstand außerdem im Rahmen des von der DFG geförderten Forschungsprojekts VerkonWa - Verfassungskonforme Umsetzung von elektronischen Wahlen.