

Automatische Übersetzung von der Deutschen Gebärdensprache in die deutsche Lautsprache

Anna Biselli, Patrick Reipschläger, Markus Berg und Antje Düsterhöft

Hochschule Wismar
University of Applied Sciences:
Technology, Business and Design
<http://mmt.et.hs-wismar.de>

Abstract: In diesem Paper wird ein Konzept für die Umsetzung eines automatischen Übersetzers von der Deutschen Gebärdensprache (DGS) in die deutsche Lautsprache mittels eines datenhandschuhbasierten Systems vorgestellt. Grundlage hierfür sind zwei Datenhandschuhe, die das manuelle Gebärden erkennen, indem sie über eine kabellose Verbindung Daten an ein Verarbeitungsgerät, beispielsweise ein Smartphone senden, welches auch die Ausgabe der Übersetzung für den Hörenden über Lautsprecher und ein Text-To-Speech-System vornimmt. Es werden die Anforderungen an ein solches System untersucht und simuliert. Dadurch werden dessen Limitierungen ermittelt, sowie Vorschläge unterbreitet, diese zu überwinden. Zum Testen des Systems wurde ein rund 200 Wörter großer Testwortschatz erstellt, für den auf Basis einer Gebärdenerkennung mit Hilfe einer Support Vector Machine Erkennungsraten bis zu 94,468% erreicht werden. Darauf aufbauend wird die Implementierung eines modularen transferbasierten Übersetzungssystems beschrieben, das eine syntaktische Analyse der transkribierten Gebärden und die lexikalische Synthese in gesprochenes Deutsch leistet.

1 Einführung

Die Kommunikation zwischen Gehörlosen und Hörenden ist ein Problem, für das es bislang noch keine befriedigende Lösung gibt. Die Verständigung zwischen diesen beiden Gruppen verläuft folglich oft nur rudimentär und für beide Seiten unbefriedigend oder findet gar nicht statt. Vor allem fehlt den Gehörlosen die Möglichkeit, in ihrer Muttersprache, der Deutschen Gebärdensprache, zu kommunizieren und somit das volle Spektrum an sprachlichen Mitteln auszuschöpfen, das ihnen zur Verfügung steht. Durch das Schaffen einer Technik für die Übersetzung der Gebärden in eine für den Hörenden verständliche Form eröffnen sich neben der offensichtlichen Verbesserung der direkten Kommunikation in alltäglichen Situationen gleichzeitig auch weitere Möglichkeiten. So zum Beispiel die Chance, intensiveren Austausch zwischen Gehörlosen und Hörenden zu betreiben, der über die Bewältigung von Routine-situationen hinaus geht und es den Betroffenen ermöglicht auch am kulturellen Leben des Anderen teilhaben zu können.

Die Erkennung und Übersetzung von Gebärdensprachen ist eine sehr stark interdisziplinäre Aufgabe, bei der neben der Sensorik zur Erfassung der Gebärden vor allem Teilgebiete der künstlichen Intelligenz beteiligt sind, insbesondere das maschinelle Lernen und die Computerlinguistik mit der maschinellen Übersetzung. Daraus ergeben sich auch die beiden Schwerpunkte bei der Entwicklung eines Übersetzungssystems für Gebärdensprachen: Die Erkennung der einzelnen Gebärden auf der einen und die Übertragung der grammatikalischen Strukturen auf der anderen Seite.

In diesem Paper wird zunächst auf die besonderen Herausforderungen eingegangen, welche die automatisierte Übersetzung von Gebärdensprachen von Lautsprachen unterscheidet. Danach werden bereits vorhandene Ansätze zur Gebärdenspracherkennung und -übersetzung erläutert und ein Entwurf vorgestellt, der anschließend evaluiert wird. Das Paper schließt mit einem Ausblick auf die Möglichkeiten zukünftiger Verbesserungen und Weiterentwicklungen.

2 Besonderheiten der DGS bei der maschinellen Übersetzung

Im Gegensatz zur deutschen Lautsprache, welche durch Sprachlaute artikuliert wird und das Ohr zur akustischen Rezeption der Sprache verwendet, erfolgt in der Gebärdensprache die Signalerzeugung durch den gesamten Körper und die Rezeption derselben visuell. Überdies ist die DGS keine bloße Abbildung der deutschen Lautsprache, sondern als eigenständige und vollwertige Sprache, auch im linguistischen Sinne, anzusehen. Eigene Phonologie, Morphologie und Syntax sind alle in ihrer linguistischen Entsprechung in der Gebärdensprache vorhanden und weisen teils sehr große Unterschiede verglichen mit der deutschen Lautsprache auf.

Neben Handgebärden werden für die Kommunikation auch die Mimik, sowie Kopf- und Körperhaltung verwendet. Diese dienen zum Ausdruck von kontextunterstützenden Merkmalen und zur grammatikalischen Flexion der Grundgebärden. Hierbei werden oftmals im Gegensatz zur Lautsprache viele Flexionen simultan vorgenommen, da beispielsweise Handform, Mimik und Bewegung gleichzeitig modifiziert werden können, um unterschiedliche grammatikalische Zusammenhänge zu verdeutlichen, wohingegen im Lautsprachlichen immer eine serielle Aneinanderreihung von Lauten erfolgen muss. Dies stellt eine Herausforderung sowohl für die Erkennung dieser gleichzeitigen Parameter, als auch für die Übersetzung dar, die teilweise parallel erzeugte, implizite Bedeutungsbestandteile in explizite, aufeinanderfolgende Äußerungen umwandeln muss. Außerdem ist die Gebärdensprachforschung in Deutschland ein vergleichsweise junges Forschungsgebiet. Es gibt daher keinen definierten Sprachstandard, wie das Hochdeutsche, sodass teilweise große regionale Unterschiede zwischen einzelnen Gebärdensprachdialekten bestehen.

3 Verwandte Arbeiten

Im Folgenden wird ein kurzer Eindruck gegeben, welche unterschiedlichen Ansätze international zur Erkennung und Übersetzung von Gebärdensprachen verfolgt werden und zu welchen Ergebnissen diese gelangt sind. Am Georgia Institute of Technology wurden Ergebnisse veröffentlicht, bei denen die Daten einer am Kopf befestigten Kamera und eines Accelerometerhandschuhs zur Klassifikation benutzt wurden (Brashear *et al.*, 2004). Bei einem Testwortschatz von 141 Wörtern und einer einfachen Grammatik, die insgesamt 665 verschiedene Sätze generieren konnte, wurde mittels Hidden Markov Modellen eine Erkennungsgenauigkeit von 94,19% für jene Daten, mit denen das Modell trainiert wurde und noch 87,63% für einen unabhängigen Testdatensatz erzielt. Nicht berücksichtigt wurde jedoch die Unterscheidung von Handformphonemen, da das System keine Erkennung der Fingerposition leistete. An der Universität von Mexiko wurde ein tragbares System entwickelt, dass die 27 Buchstaben der Mexikanischen Gebärdensprache erkennt, indem es über zwei Dehnmessstreifen und einen Ultraschallpositionssensor Daten drahtlos an einen PC übermittelt (Angulo und Silva, 2005). Durch die Verwendung von neuronalen Netzen wurde eine Erkennung der Buchstaben vorgenommen. Das System erreichte Genauigkeiten von bis zu 98,88%, hatte jedoch den entscheidenden Nachteil, dass die Benutzung von neuronalen Netzen rechenzeit- und speicherintensiv ist und somit auf einen PC ausgelagert werden musste, was das System zwar tragbar, jedoch unflexibel machte. Auf europäischer Ebene sind die RWTH Aachen und die National Technical University of Athens Vorreiter bei der Gebärdenspracherkennung. Beide arbeiten mit kamerabasierter Spracherkennung. Die Forschung an der RWTH Aachen (Dreuw *et al.*, 2007) basiert darauf, Methoden der klassischen Spracherkennung auf die Gebärdenspracherkennung zu übertragen, wie zum Beispiel aus einzelnen Phonemen ein n-gram Sprachmodell zu erstellen. Mit dieser Methodik wurden mit Hilfe eines 104 Wörter umfassenden Korpus und eines Bayesschen Netzes zur Erkennung von Handposition, -ausrichtung, und Geschwindigkeit Fehlerraten mit minimal 17,9% erzielt. Im Rahmen des DictaSign-Projektes der EU führt die Universität Athen die Schirmherrschaft bezüglich der Gebärdenerkennung. Das Gesamtprojekt hat das Ziel, die Kommunikation Gehörloser im Internet untereinander zu vereinfachen, indem sie zu Hause vor einer Kamera Inhalte gebärden können, die dann durch die Erkennung in ein speichersparendes Format überführt werden und von anderen Nut-

zern abgespielt werden können. Das Abspielen übernimmt ein Avatar, was die Anonymität der Nutzer zusätzlich schützt. Durch das interne Speicherformat können Texte auch bei der Ausgabe in verschiedene Gebärdensprachen übersetzt werden. Konkrete Erkennungsergebnisse sind noch nicht veröffentlicht, da sich das Projekt noch in der Entwicklungsphase befindet.

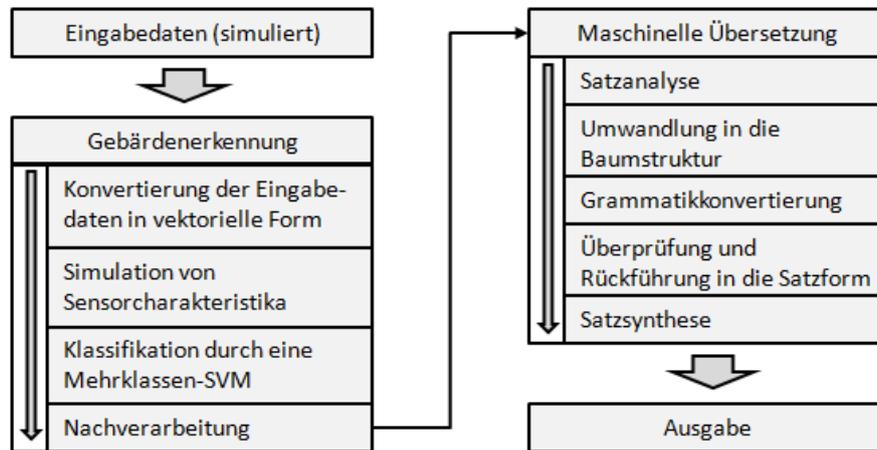


Abbildung 1: Architektur des Prototypen

4 Gestenerkennung

Der erste Teil des Systemes besteht aus der Erkennung der ausgeführten Gebärde und der Transkription in eine Informationsstruktur, die für die Grammatikkonvertierung benutzt werden kann. Da die Klassifikation unabhängig von der Simulation sein soll, um sie auch über den Prototypen hinaus benutzen zu können, werden die Funktionalitäten, die für die Klassifizierung zur Verfügung stehen, in einem separaten, austauschbaren Modul bereitgestellt. So wird auch der Test verschiedener Klassifikationsmethoden ermöglicht.

- **Eingabedaten:** Die Eingabedaten liegen bedingt durch die Simulation in Form eines Wörterbuches aus Gebärdenkonfigurationen vor, die Informationen über Handstellung, -position, -orientierung und -bewegung enthalten und zwecks grammatikalischer Funktionen, wie der Flexion von Gebärden, modifiziert werden können. Außerdem werden auch mimische Informationen unterstützt, auch wenn diese noch nicht von der eigentlichen Erkennung berücksichtigt werden. Die Simulationsdaten müssen zur Verarbeitung durch die Klassifikationsmethode in vektorielle Form gebracht werden, wozu dem Klassifikationsmodul ein Objekt zur Verfügung gestellt wird, das verschiedene Funktionalitäten zur Konvertierung enthält. Somit sind die eigentlichen Klassifikationsmodule frei von Bezügen zur simulierten Gebärdenstruktur, was die Unabhängigkeit von der konkreten Umsetzung der Simulation für künftige Entwicklungen sicherstellt, da alle möglichen Eingabeformate vor der Klassifikation in die benötigte vektorielle Darstellung gebracht werden. Zusätzlich erfolgt in diesem Schritt die Berücksichtigung von Handschuhcharakteristika, sodass die Verwendung realitätsnaher, unscharfer Werte zur Klassifikation sichergestellt wird.
- **Klassifikation:** Die Klassifikation selbst erfolgt durch ein dynamisch eingebundenes Modul. Im Prototypen ist eine Mehrklassen-Support-Vector-Machine umgesetzt, die die Zugehörigkeit einer Gebärde zu einer Bedeutung anhand einer Mehrheitsentscheidung trifft.

- **Nachverarbeitung:** Die Erkennungsergebnisse werden an ein Nachverarbeitungsmodul weitergeleitet. Dieses ist zum einen dafür zuständig, die Erkennung von Informationen zu simulieren, die durch die Klassifikation noch nicht abgedeckt werden, im speziellen nonmanuelle Informationen. Darüber hinaus ermittelt es Daten, die erst im Gesamtkontext eines fertig erkannten Satzes abgeleitet werden können. Das Ergebnis dieses Prozesses wird anschließend an das Grammatik-konvertierungsmodul übergeben.

5 Klassifikationsergebnisse

Für den Test des Prototypen wurde ein Wörterbuch mit insgesamt 188 Einträgen erzeugt. Darüber hinaus wurden 5 verschiedene Datenhandschuhkonfigurationen erstellt, bei denen 4 jeweils real existierenden Datenhandschuhen nachempfunden sind und ein weiterer möglichst ideale Sensorbedingungen simulieren soll. Da die aufgeführten Handschuhe alle beinahe identische Sensorauflösungen (10 bis 12 Bit) sowie Messungenauigkeiten aufweisen und die Wiederholungsgenauigkeit des virtuellen Gebärdenden der Vergleichbarkeit halber in allen Fällen 5 Prozent beträgt, lässt sich zeigen, dass unterschiedliche Erkennungsraten nicht in der variablen Genauigkeit der Sensoren begründet liegen, sondern davon abhängig sind, welche und wie viele Sensoren vorhanden sind.

Insbesondere gebärdensprachliche Phoneme sind hier aufschlussreich, denn in Fällen, in denen ein Handschuh ein phonemisches Merkmal nicht erfasst, ist auch zu erwarten, dass er ein Minimalpaar¹ dieses Phonems nicht mehr auseinanderhalten kann. Das demonstrieren die in Tabelle 1 aufgeführten, getesteten Minimalpaare. Leicht erkennbar ist, dass nur das Handformminimalpaar MEIN/MUT von

Modell	MEIN/MUT	BAUER/DUMM	DU/ICH	gesamt
5DT Data Glove 5 Ultra	100%	20%	40%	58,67%
5DT Data Glove 14 Ultra	100%	25%	5%	60,67%
DG5 VHand	100%	30%	100%	80,67%
CyberGloveII	100%	30%	30%	47,32%

Tabelle 1: Ergebnisvergleich für 3 Minimalpaare

allen Handschuhen exakt erfasst werden kann. Alle weiteren Minimalpaare sind nicht erfassbar und ihre Erkennungsrate ist quasi zufällig. Nur der *DG5 VHand*-Handschuh, der als einziger über ein Accelerometer verfügt und so die Handorientierung erfassen kann, ist in der Lage, so das Orientierungsminimalpaar DU/ICH zu unterscheiden. Da keiner der Handschuhe über eine Möglichkeit zur Positionsmessung verfügt, lässt sich mit keinem der angegebenen Modelle das Paar BAUER und DUMM, das sich nur durch seine Ausführungsposition unterscheidet, auseinanderhalten.

Aus diesen Ergebnissen lassen sich die folgenden Mindestanforderungen an einen Datenhandschuh zur Erfassung von Gebärden formulieren:

1. Für jeden Finger muss mindestens ein Beugungssensor sowie ein Abduktionssensor vorhanden sein, um die Handform erfassen zu können.
2. Es muss eine Möglichkeit gegeben sein, die Handorientierung im Raum zu erfassen, in der Regel in Form eines Accelerometers.
3. Die Position der Hand im Raum, bzw. bezüglich des Körpers des Gebärdenden muss erfasst werden können.
4. Die Übertragungsrate zum Verarbeitungsgerät muss hoch genug sein, um Bewegungsmuster zu erkennen.

¹Als Minimalpaare bezeichnet man Gebärden, die sich nur in einem Merkmal unterscheiden.

Da keiner der aufgeführten Handschuhe diese Anforderungen erfüllt, wären für einen „idealen“ Datenhandschuh zusätzliche Sensoren nötig.

Die ermittelte Klassifikationsgenauigkeit für einen solchen simulierten Idealhandschuh (mit einer Auflösung von 12 Bit für alle Sensoren, einer Messungenauigkeit von 1%, einer Ausführungsungenauigkeit von 5%, sowie einer Übertragungsrate von 20 Hz) in Bezug auf das gesamte zugrundeliegende Wörterbuch beträgt 94,468%, was deutlich macht, dass die Grundgebärdenerkennung mittels der implementierten Support Vector Machine sehr gute Ergebnisse liefert.

Die augenscheinlichste Limitierung eines handschuhbasierten Systems ist die mangelnde Unterstützung nonmanueller Merkmale einer gebärdeten Aussage. Diese Einschränkung macht beispielsweise die Unterscheidung von Frage- und Aussagesätzen unmöglich, was für die Kommunikation nicht akzeptabel ist. Dennoch ist der Ansatz einer handschuhbasierten Erkennung weiterzuverfolgen, eine Erweiterung um eine Gesichtsanalyse ist aber in Betracht zu ziehen, um verschiedene nonmanuelle Parameter erfassen zu können.

6 Maschinelle Übersetzung

Basierend auf dem während der Klassifikation erstellten Satz erfolgt die Übersetzung in die deutsche Sprache. Hierzu wird ein transferbasiertes maschinelles Übersetzungssystem verwendet, welches mit Hilfe kontextfreier Grammatiken in Chomsky-Normalform einen syntaktischen Transfer von der Quell- in die Zielsprache vornimmt. Das entwickelte System ist modular aufgebaut und ermöglicht das einfache Austauschen einzelner, für den Übersetzungsprozess relevanter Module. Der Prozess selbst lässt sich in die folgenden Phasen einteilen:

- **Satzanalyse:** Zunächst erfolgt die lexikalische Ermittlung der Wortart für alle Wörter des Satzes. Hierfür wird ein datenbankgestütztes Wörterbuch verwendet. Dieser Schritt ist wichtig, um den Satz im Nachfolgenden in eine Baumstruktur überführen zu können.
- **Umwandlung in Baumstruktur:** Hier erfolgt die Überführung des Satzes in eine Baumstruktur, was mittels der Regeln einer zuvor definierten kontextfreien Grammatik für die Eingangssprache stattfindet. Bei dem verwendeten Verfahren handelt es sich um eine modifizierte Version des CYK-Algorithmus, welcher in der Lage ist, alle Grammatikbäume zu ermitteln, welche die Bildung eines zu analysierenden Satzes erlauben.
- **Grammatikkonvertierung:** Als nächstes findet die Konvertierung der ermittelten Bäume von der Grammatik der Gebärdensprache in die der deutschen Lautsprache statt. Dies geschieht anhand von Rückschlüssen über die syntaktischen Unterschiede der Sprachen und der Rekombination der Satzglieder, um die entsprechenden Syntax abzubilden.
- **Überprüfung und Rückführung in die Satzform:** Zunächst erfolgt in dieser Phase eine Überprüfung der durch die Konvertierung erstellten Grammatikbäume durch eine einfache Implementierung des CYK-Algorithmus für die kontextfreie Grammatik der Ausgangssprache. Danach findet die Überführung der Bäume zurück in eine Satzstruktur statt.
- **Satzsynthese:** Als letzter Schritt wird die Synthese des Satzes durchgeführt, indem mithilfe des Wörterbuches die korrekten Flexionen für alle Wörter des Satzes erstellt werden.

Das System ist in der Lage, alle möglichen Übersetzungen für einen gegebenen Satz zu finden. Hierdurch werden Ambiguitäten, welche ein generelles Problem bei der maschinellen Übersetzung darstellen, zunächst ignoriert, da alle gefundenen Übersetzungen ausgegeben werden. Derzeit gibt es noch kein System zur Auswahl einer dieser gefunden Möglichkeiten. Allerdings ist durch die modulare Struktur des Systems eine derartige Modul leicht zu integrieren.

7 Evaluierung der Übersetzungsqualität

Um die Ergebnisse der Übersetzungen zu bewerten, wurde eine Umfrage konzipiert. Diese enthält einige allgemeine Fragen, um ein Bild von den Vorerfahrungen der Teilnehmer im Umgang und der Kommunikation mit Gehörlosen zu erhalten. Diese zeigen, dass viele Teilnehmer entweder noch keinen Kontakt mit Gehörlosen/Schwerhörigen hatten (46%), oder die Verständigung (im Falle von nicht vollständig Ertaubten) primär über die deutsche Lautsprache stattfand (32%). Außerdem wird der Teilnehmer zur Bewertung verschiedener Sätze auf einer Skala von 1 bis 5 aufgefordert, wobei 1 einem völlig unverständlichem Satz und 5 einem völlig fehlerfreien und klar verständlichen Satz entspricht. Bei den Sätzen handelt es sich um wörtlich transkribierte DGS-Sätze, um Übersetzungen des Prototyps und um manuell angefertigte Übersetzungen. Aus Gründen der Bewertungsneutralität wird dem Teilnehmer vorenthalten, bei welchen Sätzen es sich um manuelle oder maschinelle Übersetzungen handelt. Ihm wird diese Information lediglich im Fall der DGS-Sätze mitgeteilt, um ihm die Möglichkeit des Vergleichs mit der unverarbeiteten Äußerung zu gewährleisten.

Aus der Befragung von insgesamt 50 Probanden² geht hervor, dass die maschinelle Übersetzung als gut, wenn auch mit kleinen Fehlern, empfunden wird, die manuelle Übersetzung durchschnittlich dennoch leicht besser bewertet wurde (siehe Abb. 2). Da sich das Programm noch im Prototyp-Stadium befindet, kann zum derzeitigen Stand das Ergebnis als zufriedenstellend betrachtet werden, vor allem in Anbetracht der deutlich besseren Verständlichkeit der generierten Übersetzungen gegenüber den wörtlichen Übertragungen aus der DGS. Zur Verdeutlichung der Unterschiede, die zu einer schlechteren Bewer-

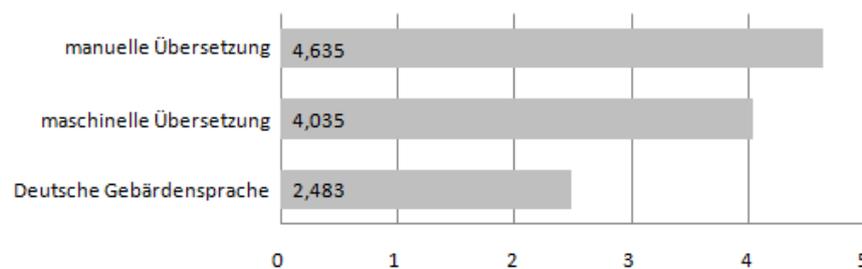


Abbildung 2: Durchschnittliche Bewertung der Übersetzungsergebnisse

tung der maschinell übersetzten Aussagen führen, soll folgendes Beispiel dienen, welches im Rahmen der Umfrage verwendet wurde und bei dem der erste Satz das Ergebnis der maschinellen Übersetzung darstellt und der zweite Satz manuell übersetzt wurde:

4,32 ↔ Heute findet ein Kind eine hübsche Blume in dem Garten.

4,64 ↔ Ein Kind findet heute eine hübsche Blume im Garten.

Aus diesem Beispiel wird ersichtlich, dass der zweite Satz besser bewertet wurde, obwohl objektiv keine inhaltlichen Unterschiede bestehen. Beide Sätze sind ebenfalls aus grammatikalischer Sicht korrekt. Die Differenz in der Bewertung kann also nur über die Position des Adverbs „heute“ und das Zusammenfügen der Präposition „in“ und der Determinante „dem“ zu der verkürzten Präposition „im“ in der manuellen Übersetzung erklärt werden.

²Stand 15.05.2011

8 Ausblick

Die Probleme, welche während der Anfertigung der Arbeit deutlich geworden sind, lassen sich vor allem auf die besondere Struktur der Gebärdensprache zurückführen. So erweist sich das Schaffen geeigneter Interpretationen für einige der mimischen Markierungen als schwierig, da für nur implizit ausgedrückte Informationen explizite sprachliche Wendungen gefunden werden müssen. So zum Beispiel bei der Interpretation einer fragenden Mimik, die sowohl eine Frage markieren, als auch eine skeptische Grundhaltung gegenüber der Äußerung ausdrücken kann und somit durch Berücksichtigung weiterer semantischer Informationen interpretiert werden muss. Diesen Problemen wurde hauptsächlich durch die Definition der gemachten Einschränkungen begegnet. Wünschenswert wäre jedoch eine komplette Interpretation der Deutschen Gebärdensprache. Eine Erweiterung des Wörterbuches auf den Umfang allgemeinen Umgangssprache wäre ebenfalls sinnvoll, da die Wortvariation der Sätze derzeit stark begrenzt ist. Der Informationsgehalt pro Wort hat sich jedoch für alle Zwecke als ausreichend erwiesen. Rückblickend ist festzustellen, dass der entstandene Prototyp bereits jetzt vielversprechende Ergebnisse für die Übersetzung der Gebärdensprache liefert, um letztlich eine barrierearme Verständigungsmöglichkeit zwischen Gehörlosen und Hörenden zu schaffen und Hindernisse in der Kommunikation zu überwinden. Da die Entwicklung noch am Anfang steht, bietet sie aber auch noch viel Potential zur Verbesserung, die zu einem großen Teil aufgrund der modularen Struktur des Systems durchführbar sind, ohne dass andere Programmteile hierdurch beeinträchtigt werden oder ebenfalls verändert werden müssen.

Literatur

- Angulo, R. V. und Silva, H. H. (2005). A wearable neural interface for realtime translation of spanish deaf sign language to voice and writing. Technical report, Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- Brashear, H., Starner, T., Lukowicz, P., und Junker, H. (2003). Using multiple sensors for mobile sign language recognition. Technical report, Georgia Institute of Technology and Wearable Computing Laboratory, Zürich.
- Brashear, H., Starner, T., McGuire, R. M., Ross, D. S., Hernandez-Rebollar, J., und Henderson, V. (2004). Towards a one-way american sign language translator. Technical report, Georgia Institute of Technology.
- DictaSign (2011). Dictasign. <http://www.dictasign.eu>.
- Dreuw, P., Rybach, D., Deselaers, T., Zahedi, M., und Ney, H. (2007). Speech recognition techniques for a sign language recognition system. Technical report, RWTH Aachen.
- Hsu, C.-W., Chang, C.-C., und Lin, C.-J. (2010). A practical guide to support vector classification. Technical report, National Taiwan University.
- Kecman, V. (2001). *Learning and Soft Computing - Support Vector Machines, Neural Networks and Fuzzy Logic Models*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Leuninger, H. und Happ, D., editors (2005). *Gebärdensprachen: Struktur, Erwerb, Verwendung*. Helmut Buske Verlag.
- Mehling, K. (2010). Heute hier, morgen dort - deixis und anaphorik in der deutschen gebärdensprache.
- Padden, C. (1986). Verbs and role-shifting in american sign language. Technical report, University of California, San Diego.

- Papaspyrou, C., von Meyenn, A., Matthaei, M., und Herrmann, B. (2008). *Grammatik der Deutschen Gebärdensprache aus der Sicht gehörloser Fachleute*. Signum Verlag, Seedorf.
- Prillwitz, S. (2005). Das sprachinstrument von gebärdensprachen und die phonologische umsetzung für die handformkomponente der dgs. In Leuninger und Happ (2005), Seiten 29 – 42.
- Starner, T., Weaver, J., und Pentland, A. (2007). A wearable computer based american sign language recognizer. Technical report, Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- Stokoe, W. C. J. (1960). Sign language structure: An outline of the visual communication system of the american deaf. *Studies in Linguistics*.