

Wissenschaftsmethodischer Teil zu:

Handwriting kinematics during learning to write with the dominant left hand in converted left-handers

Materialien und Methoden

Studiendesign und Teilnehmer

Die vorliegende Studie folgte einem Längsschnittdesign. Die Schreibkinematik von konvertierten Linkshändern, die das Schreiben mit der dominanten linken Hand trainierten, wurde mit einem festen Protokoll zu Beginn und während des zweijährigen Trainingsprogramms 3, 6, 9, 12, 18 und 24 Monate nach Beginn des Trainings beurteilt. Eine Abweichung von bis zu 10 % des angestrebten Sitzungszeitintervalls wurde als akzeptabel angesehen. Eine Gruppe nicht umgewandelter Linkshänder diente als Kontrollpersonen und nahm an einer einzigen Sitzung teil, um das Schreiben mit der linken Hand der Trainingsgruppen nach 24 Monaten mit dem der nicht umgewandelten Linkshänder zu vergleichen.

Elf konvertierte Linkshänder wurden über das *Erste Deutsche Beratungs- und Informationszentrum für Linkshänder und konvertierte Linkshänder* in München rekrutiert, das sie kontaktierten, um unter professioneller Anleitung das Schreiben mit ihrer dominanten linken Hand zu erlernen. Die Eignung der konvertierten Linkshänder zur Teilnahme am Trainingsprogramm wurde zu Beginn der Studie überprüft. Einschlusskriterien waren die ausschließliche Verwendung der nicht-dominanten rechten Hand zum Schreiben bei gleichzeitiger Verwendung der dominanten linken Hand für andere Tätigkeiten, die zu erwartende regelmäßige und konsequente Teilnahme am Training und an der kinematischen Untersuchung sowie die physische und psychische Eignung. Ausschlusskriterien waren neurologische Erkrankungen wie Multiple Sklerose, Epilepsie oder schwere Migräne. Elf nicht umgewandelte Linkshänder, die in Bezug auf Alter, Geschlecht und Gesamthändigkeitswerte übereinstimmten, wurden durch Mundpropaganda und soziale Medien als Kontrollgruppe rekrutiert. Die Studie wurde in Übereinstimmung mit den ethischen Standards der Deklaration von Helsinki durchgeführt, und alle Teilnehmer gaben eine schriftliche Einverständniserklärung ab. Ein Teil der konvertierten Linkshänder nahm an einer früheren Studie¹⁶ teil, die an der Universität Hamburg durchgeführt wurde. Die Genehmigung dieser Studie durch die Ethikkommission der Universität Hamburg umfasste das Protokoll für das Training zur Umkehr der Händigkeit und die Einverständniserklärung.

Interventionen und Verfahren

Ausbildungsprogramm

Das 2-Jahres-Programm war so konzipiert, dass die Handschriftleistung auf der Grundlage ergonomischer Prinzipien durch tägliche Übungen zu Hause trainiert wurde, um die graphomotorischen Fähigkeiten der linken Hand der Teilnehmer zu entwickeln und zu verbessern. Zu Beginn des Programms lag der Schwerpunkt auf dem Üben von Komponenten einfacher Schreibbewegungen mit der linken Hand; zu den täglichen Aufgaben gehörten Fingerübungen (8 Min.), Schraffieren, Kritzeln und Zeichnen (3 Min.) und Durchpausenübungen (10 Min.). Etwa ab der fünften Woche wurde zusätzlich das Schreiben einfacher Buchstabenkombinationen (5 min) integriert. Nach ca. 6 Monaten wurde schließlich die Trainingszeit für

Finger- und Durchschreibübungen reduziert (Finger 3 min; Durchschreiben 5 min) und das Abschreiben von Texten mit der dominanten linken Hand (5 min) eingeführt. Damit betrug die tägliche Trainingszeit je nach Programmstufe ca. 20 bis 25 Minuten. Bei wiederkehrenden Terminen in der Beratungsstelle, die mit der Erfassung der Handschriftkinematik verbunden waren, wurden die Aufgaben erklärt, demonstriert und die Trainingsfortschritte der Teilnehmer von einem spezialisierten Ergotherapeuten oder Psychotherapeuten (Linkshänderberater) überprüft. Kurz nach Beginn der Studie wurden bei der ersten Beratung die korrekte Schreibhaltung und die Übungen für den ersten Monat des Trainings festgelegt. Innerhalb von 12 Monaten begannen die meisten, ganze Texte mit der linken Hand zu schreiben. Trainingsfortschritt und -einhalten wurden bei den regelmäßigen Treffen mit dem Betreuer besprochen. Darüber hinaus führten die Teilnehmer ein Tagebuch, in dem sie ihre täglichen Trainingseinheiten festhielten. Eine ausführlichere, deutschsprachige Beschreibung des Programms findet sich unter²⁸.

Analyse der Händigkeit

Die Händigkeit wurde mit einem angepassten Fragebogen zur Händigkeit (Sattler, 2004, gekürzte Version) ermittelt, der der Trainingsgruppe zu Beginn der Studie und den Kontrollpersonen bei ihrer einzigen Testsitzung vorgelegt wurde. Die Teilnehmer wurden aufgefordert, Alltagsgegenstände (z. B. Kreisel, Perlen, Behälter, Bauklötze, Besen, Stift, Kugelschreiber, Besteck, Anspitzer, Schere), die zentral vor jedem Probanden platziert wurden, um eine Verzerrung der Tendenz zum Gebrauch beider Hände zu vermeiden, direkt auszuführen oder zu pantomimisieren. Bei allen Aufgaben wurde die Verwendung der Hände beobachtet und dokumentiert. Daraus wurde für jeden Teilnehmer ein prozentualer Gesamtwert berechnet, der die Händigkeit angibt, d. h. den Anteil der Tätigkeiten, bei denen die linke Hand benutzt wurde. Wurden beispielsweise alle Aufgaben mit der linken Hand ausgeführt, betrug der Wert für die Händigkeit 100 %. Zusätzlich wurde unterschieden zwischen Tätigkeiten, bei denen die benutzte Hand kaum durch das soziale Umfeld beeinflusst wird, wie Zähneputzen, Perlen sammeln und auffädeln, Deckel öffnen und einen Handbesen halten, und Tätigkeiten, die für solche Einflüsse anfällig sind, wie z. B. Handschreiben, Werfen, Malen, Benutzen von Besteck und Scheren (*weniger geprägte* versus *geprägte* Tätigkeiten). *Weniger geprägte* Tätigkeiten werden als besonders wertvoll für die Bestimmung der angeborenen Händigkeit angesehen. Die Werte für die Prägung wurden berechnet, indem die Anzahl der mit der linken Hand ausgeführten *geprägten* (*weniger geprägten*) Tätigkeiten durch die Gesamtzahl der *geprägten* (*weniger geprägten*) Tätigkeiten dividiert wurde. Bei den Schreibgewohnheiten wurde zusätzlich abgefragt, ob die Teilnehmer mehr als 5 Minuten pro Tag mit der Hand schrieben und ob sie häufiger mit dem Computer oder mit der Hand schrieben oder beides gleich häufig verwendeten. Die Probanden wurden als Viel- oder Wenigschreiber eingestuft, wobei das Schreiben mit der Hand von durchschnittlich mehr als 5 Minuten pro Tag dem Vielschreiben entspricht.

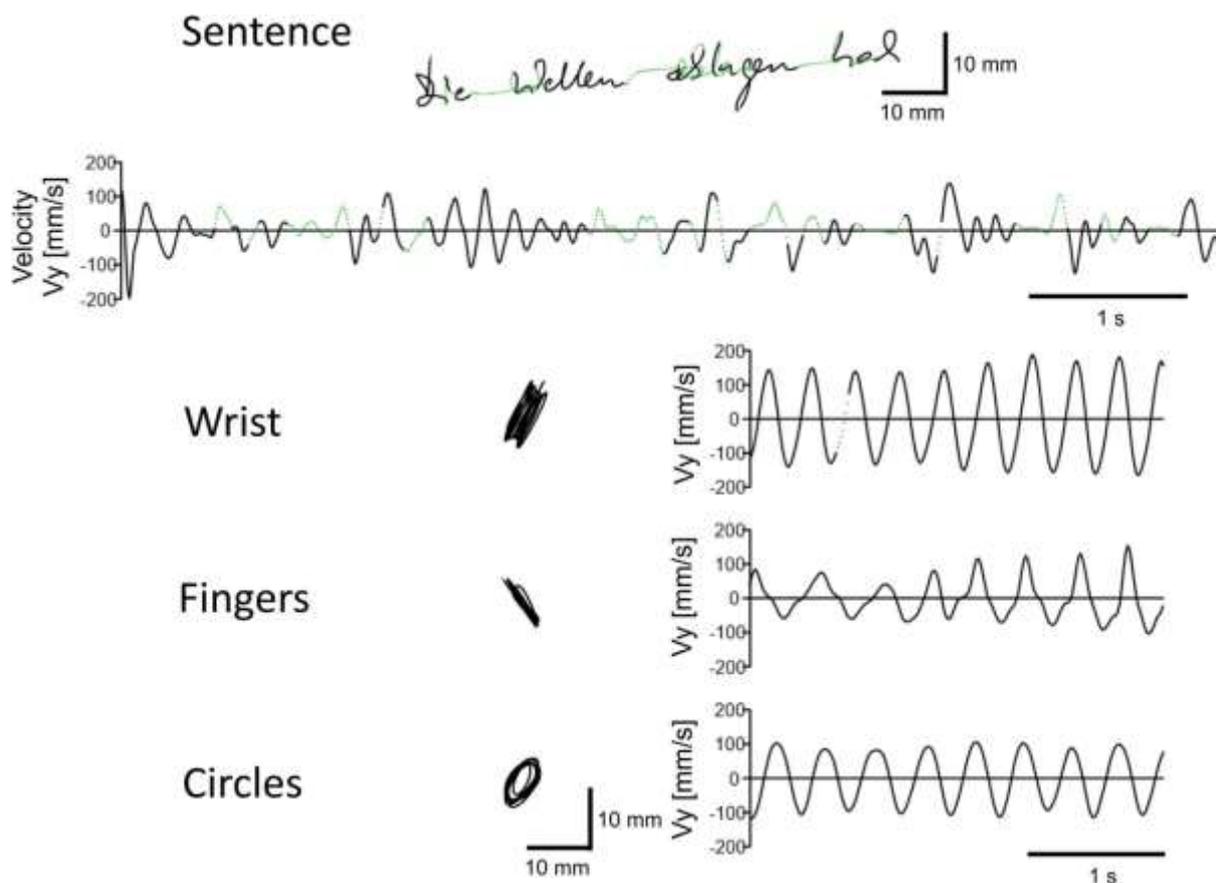
Kinematische Analyse der Handschrift

Handschriftliche Spuren wurden mit einem Grafiktablett (Intuos IV, Wacom Co., Ltd., Kazo, Japan) und einem kabellosen Digitalisierstift mit Kugelschreibermine sowie einem integrierten Sensor zur Messung der axial auf die Stiftspitze ausgeübten Kraft aufgezeichnet. Die Registrierung der Positionsdaten der Stiftspitze erfolgte mit einer zeitlichen Auflösung von 200 Hz und einer räumlichen Auflösung von 0,05 mm und ermöglichte die Erfassung von

Bewegungen mit der Spitze bis zu 10 mm über dem Tablett. Die Schreibspuren wurden auf einen Computer übertragen und dort gespeichert, und die Handschriftkinematik wurde anschließend mit einer speziellen Software (CSWin, MedCom, München, Deutschland) analysiert. Die Handschriftspuren wurden automatisch in Auf- und Abwärtsbewegungen entlang der y-Achse orthogonal zur Links-Rechts-Schreibrichtung unterteilt. Die Geschwindigkeit der Stiftspitze entlang der y-Achse wurde mit Kernel-Filtern¹² berechnet. Zu den im Rahmen dieser Studie berechneten Schreibmerkmalen gehörten die Schreibfrequenz (Hz, Anzahl der Auf- und Abwärtsstriche pro Sekunde), die Schreibdauer (ms, Zeit vom Beginn des ersten bis zum Versatz des letzten Strichs) und der Automatisierungsgrad als Anzahl der Geschwindigkeitsinversionen pro Strich und Anzahl der Teilbewegungen pro Bewegungsstrich (NIV; für Einzelheiten siehe^{(12),(29)}).

Das Testverfahren umfasste fünf Aufgaben (siehe Abb. 1). Wiederholte isolierte Handgelenk- (1-Handgelenk-Aufgabe) und Fingerbeugungs- und -streckungsbewegungen (2-Finger-Aufgabe) mit dem ergriffenen Stift bewerteten die beiden grundlegenden Handschriftelemente, d. h. Handgelenk- und Fingerbewegungen, die für die Ausführung von Auf- und Abwärtsstrichen erforderlich sind, siehe¹. Die Kombination beider Bewegungen ergab übereinander liegende Kreise oder „o's“ (3-Kreise-Aufgabe). Die Versuchsdauer der Grundschriftaufgaben (1-3) betrug 3 s. Die normale Handschrift wurde mit dem Schreiben des deutschen Satzes (4-Satz-Aufgabe) „Die Wellen schlagen hoch“ beurteilt. Die Datenaufzeichnung wurde nach Beendigung des Satzes beendet. Eine längere Schreibdauer wurde mit einer Transkriptionsaufgabe (5-Kopie-Aufgabe) getestet, bei der ein Text in einem Zeitrahmen von 3 Minuten so weit wie möglich abgeschrieben werden musste. Die Teilnehmer erledigten die Aufgaben auf einem leeren A4-Blatt, das direkt auf der Oberfläche des Tablets lag. Die Schreibproben (Satz- und Kopieraufgabe) mussten in normalem Tempo und in individueller Handschrift angefertigt werden, ohne dass auf Aspekte wie Lesbarkeit geachtet wurde. Um den selbstgewählten Schreibstil zu unterstützen und den Einfluss von Geschwindigkeits-/Genauigkeitskompromissen zu minimieren, wurden keine Anweisungen oder Hinweise zu Schriftgröße oder -form gegeben. Die grundlegenden Schreibaufgaben (Handgelenks-, Finger- und Kreis-aufgabe) wurden vor der Messung demonstriert und ihre korrekte Ausführung wurde überprüft. Die Teilnehmer wurden aufgefordert, diese Aufgaben flüssig und zügig auszuführen. Bei der *Kreisaufgabe* konnte die Bewegungsrichtung frei gewählt werden. Pro Aufgabe wurde ein Versuch aufgezeichnet. Bei Fehlern war eine Wiederholung der einzelnen Aufgaben möglich.

Abbildung 1



Die Teilnehmer begannen immer mit der Aufgabe „Satz“, gefolgt von der Aufgabe „Kopieren“, und führten dann die drei Grundaufgaben in der Reihenfolge „Handgelenk“, „Finger“ und „Kreis“ aus. In der Trainingsgruppe wurden in jeder Sitzung beide Hände getestet, zu Beginn mit der rechten Hand, aber in allen folgenden Sitzungen mit der linken Hand.

Daten und statistische Analyse

Trainings- und Kontrollgruppe wurden hinsichtlich Alter, Geschlecht, Bildung, Schreibgewohnheiten, Händigkeit und Handschriftkinematik verglichen. Die Daten zu Alter, Geschlecht, Bildung, Schreibgewohnheiten und Händigkeit wurden aus dem Fragebogen für die deskriptive Statistik gewonnen. Was die Schreibgewohnheiten betrifft, so fehlte bei einem Teilnehmer der Interventionsgruppe die Information, ob er mehr mit der Hand oder mit dem Computer oder gleichermaßen mit beiden schreibt. Das Bildungsniveau wurde entweder als Hochschulbildung (akademischer Abschluss) oder als Berufsausbildung kategorisiert. Die Unterschiede zwischen den Gruppen hinsichtlich der kategorialen Variablen Geschlecht, Bildung und Schreibgewohnheiten sowie der Variablen Alter und Händigkeitswerte wurden mit einem Chi-Quadrat-Test bzw. einem t-Test für unabhängige Stichproben ermittelt. Bei fehlender Normalverteilung (Kolmogorov-Smirnov-Test $p < 0,05$) wurden Mann-Whitney-U-Tests verwendet.

Die Schulungsteilnehmer versäumten insgesamt sieben Sitzungen. Die fehlenden Sitzungen waren nie die erste oder die letzte Sitzung. Bei sechs Teilnehmern waren die Daten vollständig; bei drei Teilnehmern fehlte eine Sitzung und bei zwei Teilnehmern fehlten zwei Sitzungen vollständig. Für diese Sitzungen wurden die fehlenden Daten durch lineare Interpolation berechnet. Aufgrund technischer Probleme fehlten bei einem Trainingsteilnehmer zusätzlich Daten in einzelnen Aufgaben der ersten Sitzung nach der Baseline, wobei die Aufgabe Satz

für beide Hände und die Aufgaben *Handgelenk*, *Finger* und *Kreis* für die linke Hand fehlten. Da wir zu Beginn der Trainingsperiode eine besondere Lerndynamik erwarteten, haben wir davon abgesehen, diese fehlenden Daten zu imputieren. Folglich wurden die Daten dieses Teilnehmers von der Varianzanalyse (ANOVA, siehe unten) ausgeschlossen, aber in den paarweisen Tests berücksichtigt.

Die abhängige Variable Häufigkeit wurde für alle Aufgaben untersucht, NIV für die komplexen Handschriftaufgaben und Dauer für die Satzaufgabe. Die Ergebnisvariablen wurden auf Normalverteilung (Kolmogorov-Smirnov-Test $p > 0,05$) für jeden Parameter, jede Gruppe, jede Hand, jede Aufgabe und jede Sitzung geprüft.

Um die Effektivität des Trainings, d.h. die Entwicklung des Schreibens mit der linken Hand der Trainingsteilnehmer im Laufe der Zeit und den Vergleich zwischen dem Schreiben mit der rechten und der linken Hand, zu untersuchen, wurde eine zweifache ANOVA mit wiederholten Messungen für die Ergebnisvariablen Häufigkeit und Dauer berechnet. Dabei wurden sowohl die Hand (zwei Niveaus: links und rechts) als auch die Sitzung (sieben Niveaus: Ausgangssituation, Sitzungen 1-6) als Within-Subject-Faktoren behandelt. Bei fehlender Sphärität (Mauchly-Test $p < 0,05$) wurden die F-Testergebnisse mit einer Greenhouse-Geisser-Korrektur angegeben. Bei signifikanten Interaktionen wurden post-hoc-Vergleiche mittels t-Tests für abhängige Stichproben durchgeführt, um die Leistung der rechten und linken Hand der Trainingsgruppen zu jedem Zeitpunkt zu vergleichen und um die Entwicklung der linken Hand in direkt aufeinanderfolgenden Sitzungen und zwischen Baseline und 24 Monaten zu vergleichen. Um den allgemeinen Typ-I-Fehler bei Mehrfachvergleichen zu kontrollieren, wurde das Signifikanzniveau von 0,05 durch die Anzahl der Vergleiche ³⁰für beide Post-Hoc-Tests geteilt, was zu einem Signifikanzniveau von jeweils 0,007 führte. Für die nicht-normalverteilte Ergebnisvariable NIV wurden Friedman- und Wilcoxon-Tests verwendet, um die Entwicklung des Schreibens mit der linken Hand der Trainingsteilnehmer zu bewerten bzw. um beide Hände zu jedem Zeitpunkt zu vergleichen. Aufgrund von Mehrfachvergleichen wurde das Signifikanzniveau für den Wilcoxon-Test auf 0,007 korrigiert. Bei signifikanten Friedman-Testergebnissen wurden paarweise Vergleiche von aufeinanderfolgenden Sitzungen und zwischen Baseline und Sitzung 6 nach 24 Monaten mit Wilcoxon-Tests durchgeführt (Signifikanzniveau 0,007).

Um die Handschrift der Trainingsteilnehmer nach 2 Jahren mit der der linkshändigen Kontrollgruppe zu vergleichen, wurden Vergleiche zwischen den Gruppen mit t-Tests für Häufigkeit und Dauer und Mann-Whitney-U-Tests für NIV durchgeführt. Bei Heterogenität der Varianz (Levene-Test $p < 0,05$) wurden die t-Testergebnisse für ungleiche Varianzen angegeben und um die Freiheitsgrade korrigiert. Um eine mögliche Beziehung zwischen Trainingseffekten und Alter sowie zwischen Trainingseffekten und dem Anteil der mit der linken Hand ausgeführten geprägten/weniger geprägten Tätigkeiten zu untersuchen, wurden alle Teilnehmer der Trainingsgruppe hinsichtlich ihrer Verbesserung der Schreibleistung mit der linken Hand (größte Verbesserung – Rang 1; geringste Verbesserung – Rang 11) zwischen dem Ausgangswert und 24 Monaten für jeden Parameter der komplexen Handschriftaufgaben eingestuft. Der durchschnittliche Gesamtrang der Verbesserung (niedrigere Ränge – größere Verbesserungen), der sich für jeden Teilnehmer ergab, wurde dann mit Hilfe von Pearson's r mit seinem Alter, seiner Punktzahl für geprägte Aktivitäten sowie seiner Punktzahl für weniger geprägte Aktivitäten korreliert.

Für signifikante Ergebnisse wurden die Effektgrößen Cohen's *d* für t-Tests, Wilcoxon und Mann-Whitney-U-Tests und für ANOVAs. Die Datenanalyse wurde mit IBM SPSS Statistics Version 28 bei einem α -Niveau von 0,05 durchgeführt.

Ergebnisse Teilnehmer

Zweiundzwanzig Teilnehmer wurden in die Studie aufgenommen; einen Überblick über die relevanten demografischen Daten bietet Tabelle 1. Die Trainingsgruppe bestand aus 11 erwachsenen, konvertierten Linkshändern, die während der Vorschule oder des ersten Grundschuljahres zum Schreiben mit der rechten Hand wechselten. Die Kontrollgruppe bestand aus 11 angeborenen Linkshändern ohne Umstellung der Händigkeit. Beide Gruppen unterschieden sich nicht hinsichtlich der Matching-Variablen Geschlecht ($(^2)(1) = 1,64, p = 0,395$), Alter ($t(20) = 0,15, p = 0,885$) und Gesamthändigkeitsscore ($t(20) = 0,17, p = 0,101$). Darüber hinaus wurden keine Gruppenunterschiede in Bezug auf das Bildungsniveau ($(^2)(1) = 3,01, p = 0,083$) und die Handschriftgewohnheiten festgestellt, wobei sieben Teilnehmer in jeder Gruppe mehr als 5 Minuten pro Tag mit der Hand schrieben und fünf (drei/zwei) Teilnehmer in der Trainingsgruppe und neun (ein/zwei) Teilnehmer in der Kontrollgruppe häufiger (weniger/gleich häufig) am Computer als mit der Hand schrieben ((Fehler) $(^2)(2) = 32,43, p = 0,296$; siehe Tabelle 1). Für die Händigkeit bei den geprägten Aktivitäten wurden signifikante und große Gruppenunterschiede gefunden ($U = 9,00, p < 0,001, d = 2,13$), aber nicht für weniger geprägte Aktivitäten ($U = 47,50, p = 0,401$), wobei die Trainingsteilnehmer im Durchschnitt bei etwas mehr als der Hälfte ($M 55,6 \% SD 25,5$) der geprägten Aktivitäten ihre linke Hand benutzten.

Tabelle 1: Vergleich der Ausgangsdaten von Schulungsteilnehmern und Kontrollen.

Figure 2 shows the time courses of the frequencies across the sessions for both hands in the converted left-handers and the dominant left hand for the non-converted control group for the three basic writing tasks.

Abbildung 2

Für die Häufigkeit der Bewegungen der Trainingsgruppen bei der Handgelenksaufgabe (Abb. 2a) gab es weder signifikante Interaktionen zwischen Hand und Sitzung, $F(2.50, 22.51) = 1.47$, $p = 0.252$ noch signifikante Haupteffekte für Hand, $F(1, 9) = 0.03$, $p = 0.857$ oder Sitzung, $F(6, 54) = 0.97$, $p = 0.456$. Im Vergleich zu den Kontrollen führten die Trainingsteilnehmer die Handgelenksaufgabe am Ende des Programms signifikant häufiger mit der linken Hand aus, $t(19) = 3,12$, $p = 0,006$, $d = 1,36$ (siehe Abb. 2a), aber nicht mit der rechten Hand, $t(19) = 1,25$, $p = 0,226$.

Bei repetitiven Fingerbewegungen (Fingeraufgabe) gab es keine statistisch signifikante Interaktion zwischen Hand und Sitzung, $F(2.72, 24.47) = 0.46$, $p = 0.692$, aber einen signifikanten Haupteffekt der Sitzung, $F(1.82, 16.39) = 5.62$, $p = 0.016$, (Fehler) = 0,38 für die Bewegungsfrequenz der Trainingsteilnehmer. Abbildung 2b deutet darauf hin, dass der Haupteffekt hauptsächlich auf einen Frequenzanstieg innerhalb der ersten 3 Monate zurückzuführen ist. Ein paarweiser Vergleich der Frequenzen in der Finger-Aufgabe ergab jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen Baseline und 3 Monaten ($p = 0,015$, Signifikanzniveau 0,007), zwischen allen anderen aufeinanderfolgenden Sitzungen (alle $p's \geq 0,132$) oder zwischen Baseline und Sitzung 6 ($p = 0,019$), wenn Mehrfachtests berücksichtigt wurden. Da es keinen signifikanten Haupteffekt für die Hand gab ($F(1, 9) = 0,69$, $p = 0,429$), unterschieden sich die Schreibfähigkeiten der linken und der rechten Hand in dieser Aufgabe nicht, unabhängig vom Zeitpunkt. Vergleicht man die Bewegungen der rechten und linken Hand der Trainingsteilnehmer bei der Fingeraufgabe nach 24 Monaten mit denen der linken Hand der Kontrollgruppe, so zeigen sich signifikante Unterschiede, wobei die Trainingsteilnehmer sowohl mit der linken, $t(20) = 2,86$, $p = 0,010$, $d = 1,22$, als auch mit der rechten Hand, $t(20) = 2,41$, $p = 0,026$, $d = 1,03$, signifikant schneller Bewegungen ausführen als die Kontrollgruppe (siehe Abb. 2b).

Wie bei den Fingerbewegungen zeigte sich auch bei der Schreibhäufigkeit der Trainingsgruppen in der Kreislaufgabe (Abb. 2c) keine signifikante Interaktion zwischen Hand und Sitzung, $F(2.07, 18.59) = 3.13$, $p = 0.066$ und kein signifikanter Haupteffekt für die Hand, $F(1, 9) = 0.10$, $p = 0.757$, aber ein signifikanter Haupteffekt für die Sitzung, $F(6, 54) = 5.31$, $p < 0.001$, (Fehler) = 0.37. Dennoch ergaben paarweise Vergleiche der Schreibhäufigkeit der Trainingsteilnehmer keine signifikanten Unterschiede, weder zwischen aufeinanderfolgenden Sitzungen (alle $p's \geq 0,025$, Signifikanzniveau 0,007), trotz des visuell (siehe Abb. 2c) deutlichen Anstiegs der mittleren Häufigkeit zwischen Baseline und 3 Monaten, noch im direkten Vergleich von Baseline und 24 Monaten ($p = 0,011$). Nach 24 Monaten war die Häufigkeit des Kreisens mit der linken Hand ($t(14.86) = 2.09$, $p = 0.050$, $d = 0.89$; siehe Abb. 2c), nicht aber mit der rechten Hand ($t(20) = 1.43$, $p = 0.169$) signifikant höher als bei den Kontrollpersonen, die ihre dominante linke Hand benutzten.

Komplexe handschriftliche Fähigkeiten

Abbildung 3 zeigt das Skript und das Geschwindigkeitsprofil für die Ausführung der Satzaufgabe zu Beginn und in der letzten Sitzung nach zwei Jahren Übung für einen beispielhaften Trainingsteilnehmer. Die Skripte sind relativ ähnlich, abgesehen von einer unregelmäßigeren Trajektorie während der ersten Schreibversuche. Die Veränderungen zeigen sich als glattere Geschwindigkeitsspitzen mit höheren Amplituden nach der Intervention. Außerdem war die Zeit, die zum Schreiben des Satzes benötigt wurde, am Ende des Trainings wesentlich kürzer (18,26 vs. 11,42 s).

Abbildung 3

Sentence

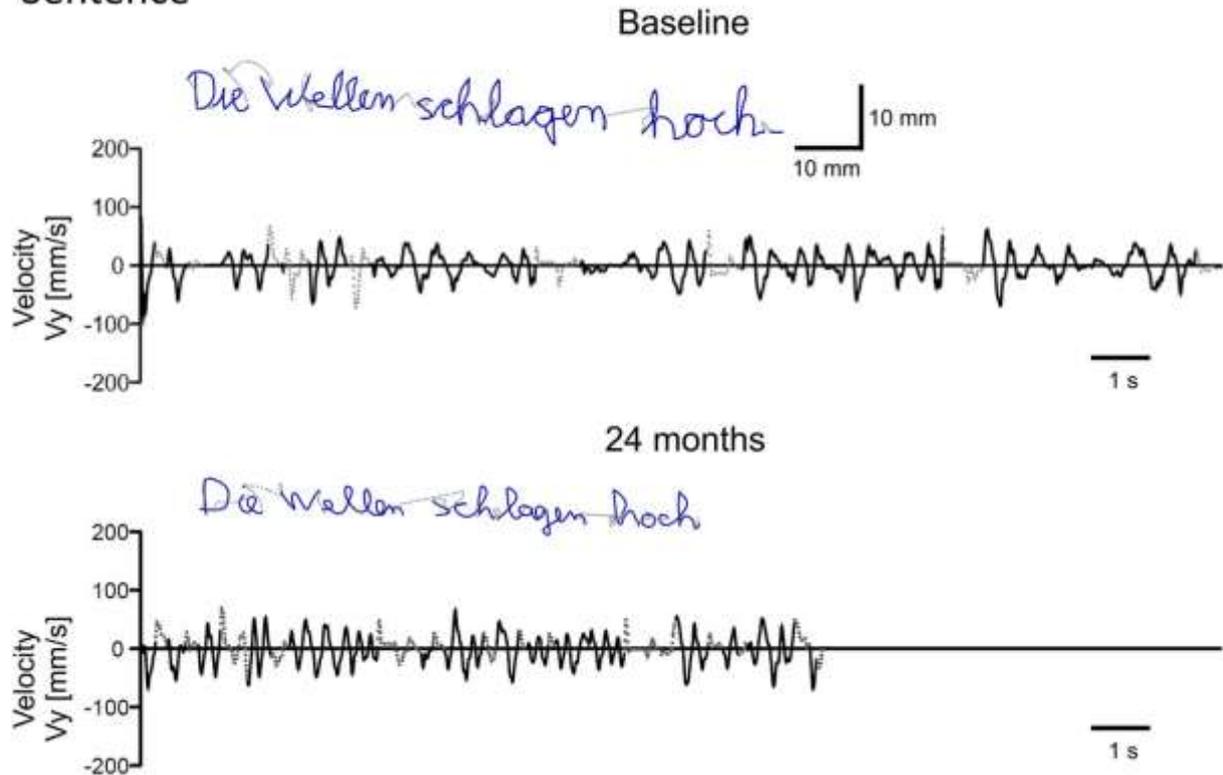
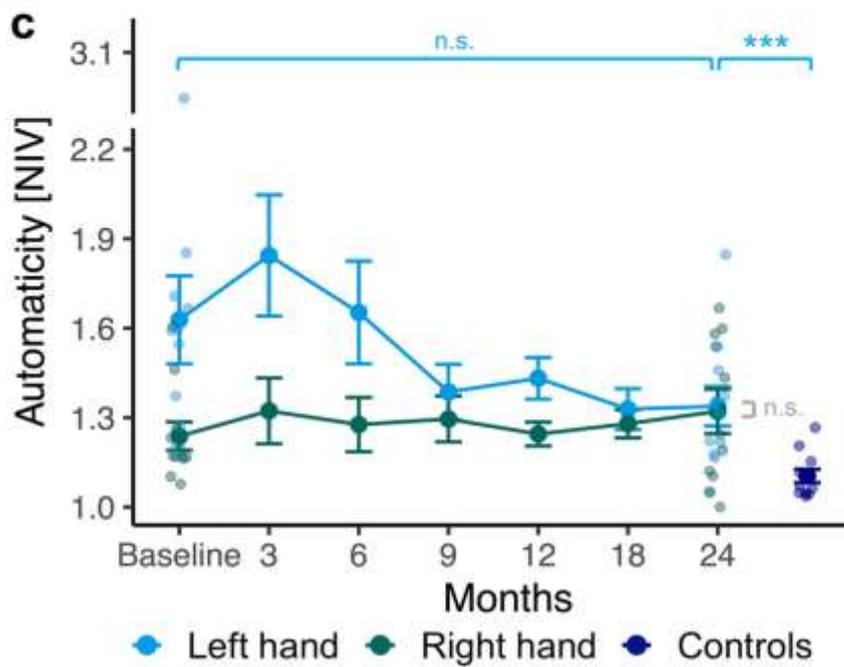
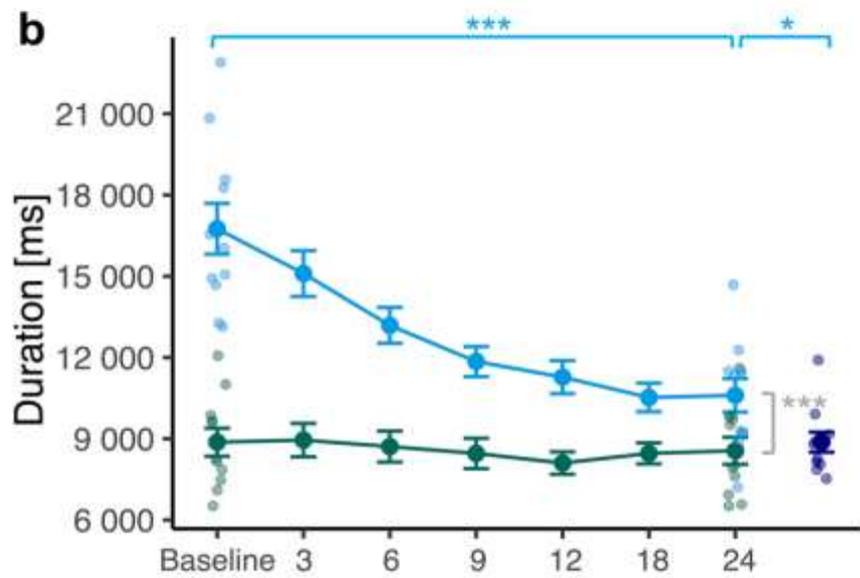
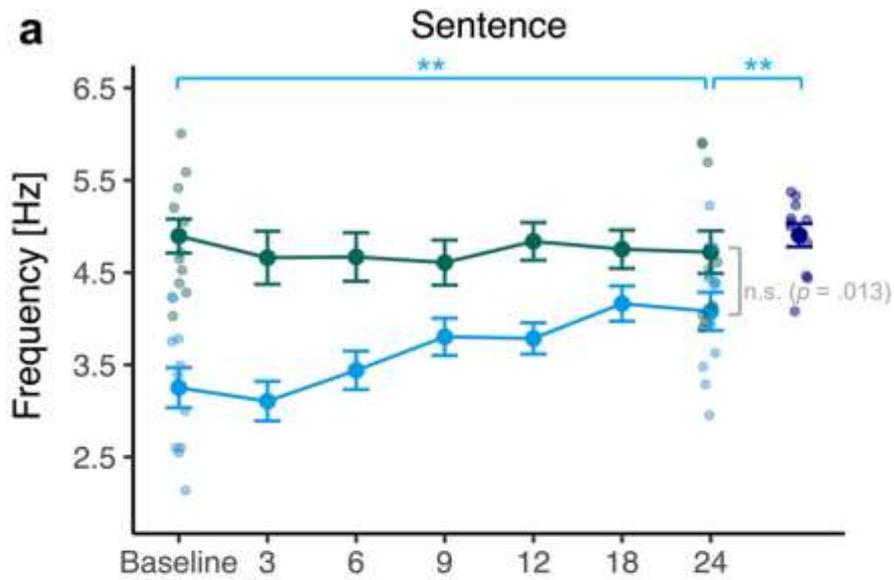


Abbildung 4 zeigt die Leistung beider Gruppen in der Aufgabe „Satz“, dargestellt durch drei Parameter. Für die Schreibhäufigkeit der Trainingsteilnehmer (Abb. 4a) zeigten sich signifikante Haupteffekte der Hand, $F(1, 9) = 32,80$, $p < 0,001$, (*Fehler*) = 0,79, Sitzung, $F(6, 54) = 4,82$, $p = 0,001$, (*Fehler* = 0,35 und eine statistisch signifikante Interaktion zwischen Hand und Sitzung, $F(6, 54) = 9,94$, $p < 0,001$, = 0,53. Was die Entwicklung der Häufigkeit des Schreibens mit der linken Hand in direkt aufeinanderfolgenden Sitzungen während des Trainings betrifft, so wurden signifikante Steigerungen zwischen Monat 6 und 9 festgestellt ($p = 0,002$). Darüber hinaus ergab der direkte Vergleich zwischen der ersten und der letzten Sitzung einen starken Anstieg der Schreibhäufigkeit der linken Hand in der Interventionsgruppe bei der Aufgabe „Satz“ ($p = 0,004$; siehe Abb. 4a). Der Vergleich der rechten und linken Hand der Trainingsteilnehmer zu jedem Zeitpunkt ergab signifikante Unterschiede zu Beginn, nach 3, 6 und 12 Monaten (alle $p < 0,001$). Nach 9 ($p = 0,009$), 18 ($p = 0,014$) und 24 Monaten ($p = 0,013$) lag die Leistung der linken Hand nicht signifikant unter der der rechten Hand (Signifikanzniveau 0,007). Im Vergleich zur linkshändigen Kontrollgruppe war die Schreibhäufigkeit der linken Hand in der *Satzaufgabe* nach 24 Monaten signifikant niedriger, $t(20) = -3,42$, $p = 0,003$, $d = -1,46$ (siehe Abb. 4a), während sich die rechte Hand nicht von der linken Hand der Kontrollgruppe unterschied, $t(20) = -0,70$, $p = 0,493$.

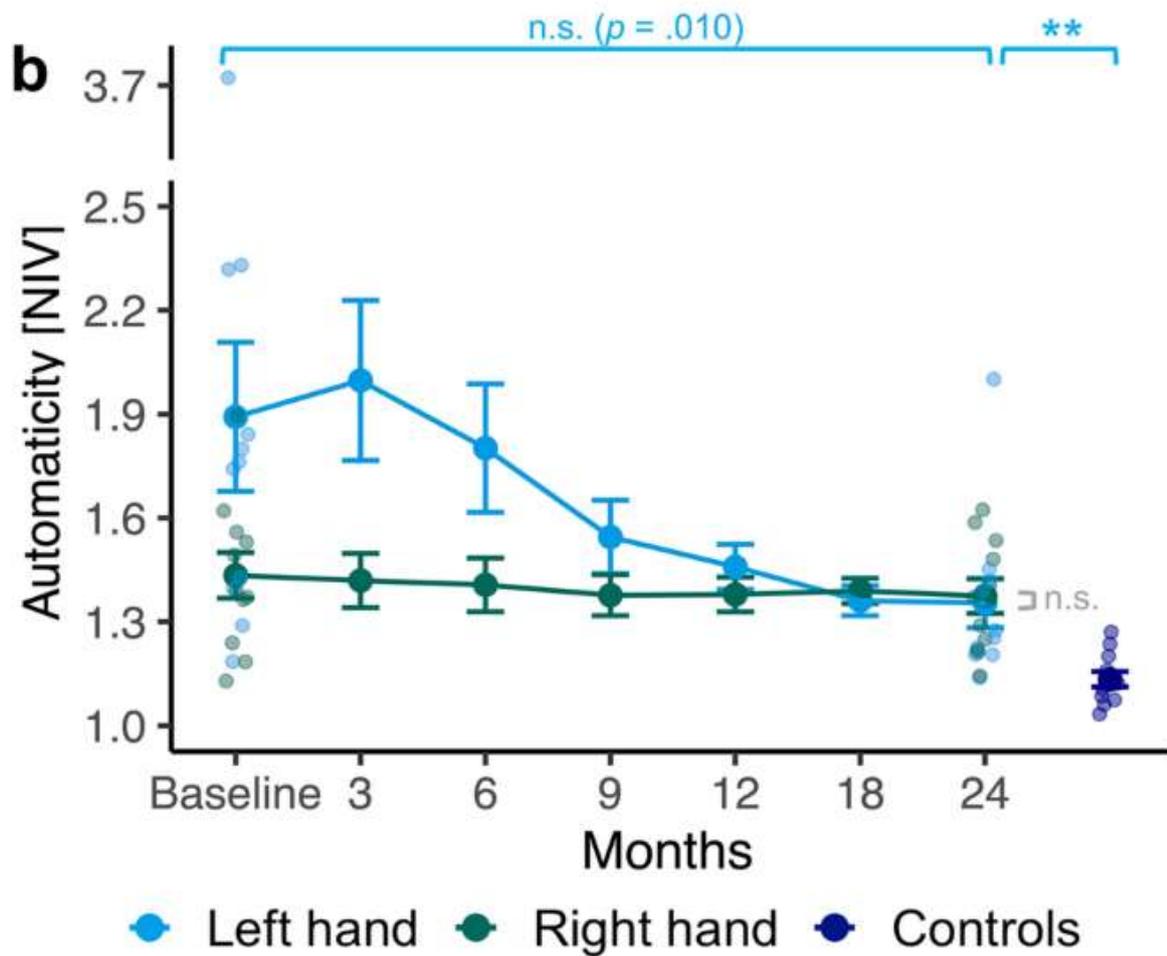
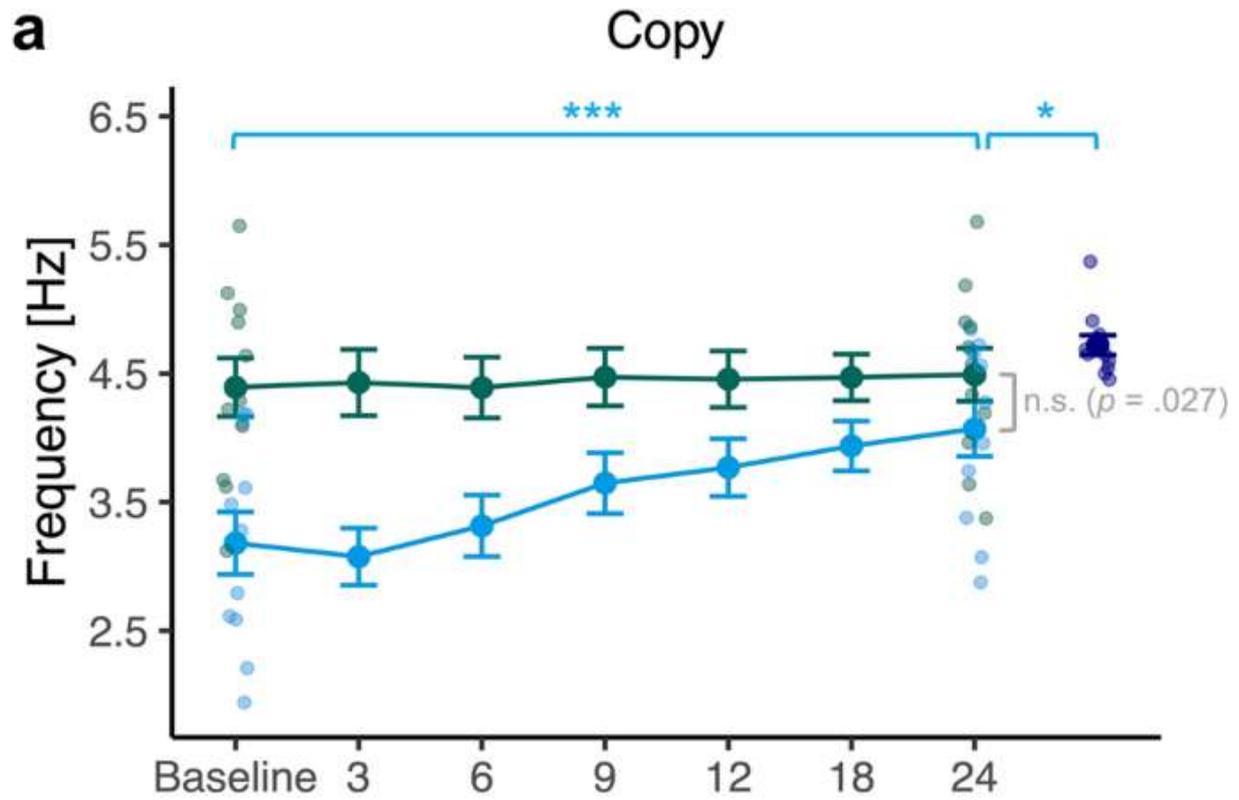
Abbildung 4



Für die Dauer bei der Satzaufgabe (Abb. 4b) waren die Haupteffekte für die Hand, $F(1, 9) = 240,02$, $p < 0,001$, (*Fehler*) = 0,96, Sitzung, $F(1,91, 17,14) = 16,70$, $p < 0,001$, (*Fehler*) = 0,65 und die Interaktion zwischen Hand und Sitzung waren ebenfalls signifikant, $F(6, 54) = 29,87$, $p < 0,001$, (*Fehler*) = 0,77 bei den Trainingsteilnehmern. Post-hoc-Paarvergleiche zwischen aufeinanderfolgenden Sitzungen zeigten signifikante Unterschiede in der Schreibdauer der Trainingsteilnehmer mit der linken Hand zwischen den Monaten 3 und 6 ($p = 0,007$) und den Monaten 6 und 9 ($p = 0,002$) und bestätigten damit die in Abb. 4b beobachtete Verkürzung der Schreibdauer mit der linken Hand. Eine deutliche Verringerung der Schreibdauer wurde auch im direkten Vergleich der Leistungen der linken Hand zwischen dem Ausgangswert und 24 Monaten festgestellt ($p < 0,001$). Dennoch war das Schreiben mit der rechten Hand in der Interventionsgruppe zu jedem Zeitpunkt signifikant schneller als das Schreiben mit der linken Hand (alle p 's $< 0,001$). Darüber hinaus war das Schreiben mit der linken Hand nach 24 Monaten signifikant langsamer, $t(20) = 2,40$, $p = 0,026$, $d = 1,02$ (siehe Abb. 4b) als das Schreiben mit der linken Hand der Kontrollgruppe, während sich die Dauer nicht unterschied, $t(20) = -0,52$, $p = 0,612$ zwischen der rechten Hand der Trainingsteilnehmer und der linken Hand der Kontrollgruppe bei der Aufgabe „Satz“.

Was die Entwicklung der NIV-Werte der Trainingsteilnehmer für die linke Hand bei der *Satzaufgabe* anbelangt (Abb. 4c), so ergaben Friedman-Tests signifikante Unterschiede hinsichtlich der mittleren Ränge über alle Sitzungen für die linke Hand, $\chi^2(6) = 13,43$, $p = 0,037$, aber nicht für die rechte Hand, $\chi^2(6) = 1,56$, $p = 0,956$. Während aus Abb. 4c hervorgeht, dass der signifikante Effekt für die linke Hand auf besondere Verbesserungen in der Automatik während der Monate 3 und 9 zurückzuführen ist, ergaben post-hoc paarweise Vergleiche mittels Wilcoxon-Tests keine signifikanten Veränderungen in der Automatik der linken Hand in den Trainingsgruppen, weder zwischen direkt aufeinanderfolgenden Sitzungen (alle p 's $\geq 0,014$; Signifikanzniveau 0,007) noch zwischen Baseline und letzter Sitzung ($p = 0,067$). Ihre NIV-Werte für die rechte und linke Hand unterschieden sich nur zu Beginn der Studie signifikant voneinander ($p = 0,002$). Nach 24 Monaten war die Handschrift der Trainingsteilnehmer während der *Satzaufgabe* durch signifikant höhere Mittelwerte der NIV sowohl für die linke ($U = 13,50$, $p = 0,001$, $d = 1,75$; siehe Abb. 4c) als auch für die rechte Hand ($U = 28,00$, $p = 0,034$, $d = 1,02$) im Vergleich zu den linkshändigen Kontrollpersonen gekennzeichnet, was auf eine insgesamt weniger automatisierte Handschrift in der Interventionsgruppe hinweist. Bei der Kopieraufgabe (Abb. 5) gab es signifikante Haupteffekte für die Hand, $F(1, 10) = 22,45$, $p = 0,001$, (*Fehler*) = 0,69 und Sitzung, $F(6, 60) = 10,91$, $p < 0,001$, = 0,52, sowie eine statistisch signifikante Interaktion zwischen Hand und Sitzung, $F(6, 60) = 18,57$, $p < 0,001$, (*Fehler*) = 0,65 für die Schreibfrequenz in der Trainingsgruppe. Ein paarweiser Post-hoc-Vergleich der Schreibhäufigkeit mit der linken Hand ergab signifikante Anstiege zwischen Monat 6 und 9 ($p < 0,001$) und zwischen Baseline und 24 Monaten ($p < .001$; siehe Abb. 5a). Was den Vergleich der Häufigkeit der rechten und linken Hand bei der *Kopieraufgabe* zu jedem Zeitpunkt betrifft, so ergaben Post-hoc-Tests signifikante Unterschiede zu Beginn des Trainings sowie nach 3, 6, 9, 12 und 18 Monaten ($p \leq 0,007$). Nach 24 Monaten Training unterschieden sich Rechts- und Linkshänderhäufigkeit nicht mehr ($p = 0,027$; Signifikanzniveau 0,007). Im Vergleich zu den linkshändigen Kontrollen war die Schreibhäufigkeit der Trainingsteilnehmer mit der linken ($t(12,59) = -2,82$, $p = 0,015$, $d = -1,20$; siehe Abb. 5a), aber nicht mit der rechten Hand ($t(12,82) = -1,01$, $p = 0,331$) bei der Kopieraufgabe nach 24 Monaten signifikant niedriger.

Abbildung 5



Das NIV-Muster der Trainingsgruppen für die Kopieraufgabe (Abb. 5b) ähnelt grafisch dem für die Satzaufgabe (Abb. 4c), wenn auch auf einem insgesamt höheren, weniger automatisierten Niveau. Friedman-Tests zum Vergleich der NIV-Werte der Trainingsteilnehmer bei der *Kopieraufgabe* über alle Sitzungen hinweg ergaben keine signifikanten Effekte für die rechte Hand, $\chi^{(2)}(6) = 1,83$, $p = 0,935$, aber für die linke Hand, $\chi^{(2)}(6) = 43,60$, $p < 0,001$. Post-hoc-Paarvergleiche ergaben signifikante Unterschiede nur zwischen den Monaten 6 und 9 ($p = 0,001$), aber nicht zwischen Baseline und 24 Monaten ($p = 0,010$; Signifikanzniveau 0,007). Beim Vergleich der mittleren Ränge der NIV-Werte zwischen der rechten und linken Hand der Interventionsgruppen pro Sitzung waren die Unterschiede nur nach 3 Monaten signifikant ($p = 0,005$). Nach 24 Monaten unterschieden sich die Leistungen der linken ($U = 15,00$, $p = 0,002$, $d = 1,65$; siehe Abb. 5b) und rechten Hand ($U = 12,00$, $p = 0,001$, $d = 1,85$) signifikant von denen der Kontrollgruppe. Folglich erreichten die Trainingsteilnehmer bei der Kopieraufgabe mit beiden Händen nicht den Automatisierungsgrad der Linkshänderkontrollen.

Bemerkenswert ist auch die hohe interindividuelle Variabilität, die bei allen Aufgaben für alle Parameter, beide Hände und beide Gruppen zu beobachten ist (siehe Abb. 2, 4, 5).

Die Korrelation der Trainingseffekte als Gesamtrang der Verbesserung bei komplexen Handschriftaufgaben (niedrigere Ränge – größere Verbesserungen) mit dem Alter ergab einen positiven r-Wert (0,48) mit niedrigeren Rängen bei jüngeren Trainingsteilnehmern, war aber statistisch nicht signifikant ($p = 0,131$). Ebenso korrelierten die Trainingseffekte weder mit dem Anteil der eingepprägten ($r = 0,35$, $p = 0,284$) noch der weniger eingepprägten Tätigkeiten ($r = 0,43$, $p = 0,184$), die mit der linken Hand ausgeführt wurden, was bedeutet, dass individuelle Unterschiede in der Menge der Tätigkeiten, die zusätzlich zur Handschrift mit der rechten Hand ausgeführt wurden, keinen Einfluss auf den Trainingserfolg hatten.