

Müller, S.; Manzey, D.; Bleyer, A.; Schreiter, K.; Voigt, A.; Luckner, R.

Untersuchung der mentalen Repräsentation von Energiemanagement bei der Flugzeugführung zur Entwicklung eines Pilotenassistenzsystems

Conference paper | Published version

This version is available at <https://doi.org/10.14279/depositonce-7822>



Müller, S.; Manzey, D.; Bleyer, A.; Schreiter, K.; Voigt, A.; Luckner, R. (2014). Untersuchung der mentalen Repräsentation von Energiemanagement bei der Flugzeugführung zur Entwicklung eines Pilotenassistenzsystems. In: Grundlagen und Anwendungen der Mensch-Maschine-Interaktion. Berlin: Universitätsverlag TU Berlin.

Terms of Use

This work is licensed under a CC BY-SA 3.0 DE (Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Germany). For more information see <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>.

Untersuchung der mentalen Repräsentation von Energiemanagement bei der Flugzeugführung zur Entwicklung eines Pilotenassistenzsystems

Simon Müller¹, Dietrich Manzey⁵⁵, Anne Bleyer⁵⁵, Karolin Schreiter², Anja Voigt⁵⁶ und Robert Luckner⁵⁶

Schlüsselwörter: Flugsimulatorversuche, Energiemanagement, Fragebogenstudie, Pilotenassistenzsystem, Mentales Modell

Zusammenfassung

Um die mentale Repräsentation des Energiemanagements bei der manuellen Flugzeugführung zu untersuchen, wurde eine Simulatorkampagne mit $n = 12$ lizenzierten Verkehrspiloten durchgeführt. Ihre Aufgabe war es, künstlich generierte Höhen- und Geschwindigkeitsablagen auf dem Gleitpfad des Instrumentenlandesystems (ILS) im Endanflug zu korrigieren. Dabei wurde untersucht, ob und inwiefern sie von dem Prinzip des Energieaustauschs Gebrauch machen. Die Ergebnisse zeigen eine wenig einheitlich ausgeprägte Repräsentation des Wissens bezüglich des Energiemanagements. Des Weiteren war zu erkennen, dass nicht die vollen Möglichkeiten des Energieaustausches genutzt wurden. Vielmehr wurden damit lediglich kleine Korrekturen durchgeführt.

Einleitung

Die manuelle Steuerung der Längsbewegung eines Flugzeugs lässt sich als Management von Gesamtenergie, bestehend aus potentieller und kinetischer Energie, zusammenfassen. Die Änderung der Flughöhe und der Fluggeschwindigkeit stehen hierbei in einem besonderen Zusammenhang. Diese beiden Flugbewegungsparameter sind direkt miteinander gekoppelt und lassen sich nur gemeinsam durch Kombination von Schub und Höhenruder steuern. Dabei wirkt sich der Schub auf die Gesamtenergie des Flugzeugs und das Höhenruder hauptsächlich auf die Verteilung der Gesamtenergie auf potentielle Energie und kinetische Energie aus (Brockhaus, Alles, Luckner, 2011).

Um eine energieeffiziente Bahnführung zu erreichen, muss der Pilot einschätzen können, welchen Energiestatus das Flugzeug zum aktuellen Zeitpunkt besitzt und wie dieser im Verhältnis zum gewünschten zukünftigen Energiestatus steht. Zur Regelung des aktuellen Flugzustands muss er sowohl die Abweichungen der Gesamtenergie vom Sollwert, als auch die Abweichungen von potentieller und kinetischer Energie vom Sollwert kennen. Dazu ist neben der Veränderung der Gesamt-

¹ Technische Universität Berlin, Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaft, Fachgebiet Arbeits-, Ingenieur- und Organisationspsychologie

² Technische Universität Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, Fachgebiet Flugmechanik, Flugregelung und Aeroelastizität

energie auch von großem Interesse, ob und wie sich potentielle und kinetische Energie anpassen lassen. Erfahrene Piloten können dieses Wissen zu Energiemanagement geschickt ausnutzen, um gewisse Ablagen energieeffizient zu korrigieren, in dem sie potentielle Energie und kinetische Energie gegeneinander austauschen.

So ist es beispielsweise möglich einen Flugzustand, in dem sich das Flugzeug über der Sollflughöhe und unterhalb der Sollgeschwindigkeit befindet, einzig durch Änderung des Nickwinkels zu korrigieren. Dadurch beschleunigt das Flugzeug und verliert gleichzeitig an Höhe, ohne dass zusätzlich der Schub oder der Widerstand angepasst werden muss.

Diese Zusammenhänge zu erkennen und zu nutzen zählt zu den schwierigsten Aspekten des manuellen Flugs (Amelink, Mulder, Paassen & Flach, 2005). Deshalb wird davon ausgegangen, dass gerade diese Aspekte viel Potential bergen, um eine Optimierung bezüglich energieeffizienter und ökonomischer Bahnführung aber auch bezüglich einer Verringerung der Arbeitsbelastung der Piloten zu erreichen. Wird das Prinzip des Energieaustauschs angewandt, spart das nicht nur Treibstoff, sondern es verringert auch die Belastungen, die mit einem ständigen Kontrollieren und Anpassen der Schubhebelstellung verbunden ist. Dieser Nutzen sollte sich im manuellen Erfliegen von zukünftigen komplexen Flugbahnen sogar noch intensivieren.

Verschiedene Maßnahmen erscheinen geeignet, den Piloten bei der anspruchsvollen Aufgabe des Energiemanagements im manuellen Flug zu unterstützen. Möglich wäre etwa eine Vermittlung des notwendigen Wissens und entsprechender Fertigkeiten durch ein gezieltes Training, die Integration von spezifischen Energieanzeigen in bestehende Bildschirmanzeigen (z.B. Primary Flight Display, siehe Lambregts, Rademaker & Theunissen, 2008 und Amelink et al., 2005) oder die Implementierung von Assistenzsystemen, die eine automatische Hilfe für effektives Energiemanagement bereitstellen.

Eine effektive Konzeption und Umsetzung von Unterstützungsmaßnahmen setzt voraus, dass Erkenntnisse darüber vorliegen, welches Wissen Piloten in Hinblick auf das Energiemanagement haben und unter welchen Bedingungen dieses Wissen wie eingesetzt wird. Nur so kann eine Planung von Unterstützungsmaßnahmen pilotenzentriert und effektiv erfolgen. Die in diesem Beitrag beschriebene Studie ist Teil einer umfassenderen Versuchsreihe. Die Versuchsreihe entstand im Rahmen des DFG-Projekts "nxControl" zur Entwicklung eines Pilotenassistenzsystems für die Unterstützung der manuellen Steuerung von Flugzeugen in Längsrichtung (für eine ausführliche Projektbeschreibung siehe Schreiter, Müller & Luckner, 2013). Dabei wurden die folgenden Annahmen für den Landeanflug untersucht:

1. Piloten unterscheiden sich in Bezug auf ihr Wissen über Energiemanagement,
2. nur Piloten, die Wissen über Energiemanagement vorweisen, wenden das Prinzip des Energieaustauschs an,

3. nur wenn die Ablage gering bzw. die Gesamtsituation nicht sicherheitskritisch ist, wird das Prinzip des Energieaustauschs angewandt.

Im Folgenden wird lediglich der für die Fragestellungen nach der mentalen Repräsentation von Energiemanagement entscheidende Teilausschnitt der Simulatorkampagne im Detail beschrieben (für weiterführende Informationen zur gesamten Versuchsreihe siehe Müller, Schreiter & Manzey, 2013).

Methode

Stichprobe: An den Versuchen nahmen zwölf Verkehrspiloten (11 männlich, 1 weiblich) teil. Durchschnittlich gaben sie rund 10000 Stunden ($SD \approx 8000$) Flug Erfahrung an. Die Altersspanne der Piloten lag zwischen 27 und 67 Jahren ($M = 43$, $SD = 12,5$). Sechs der zwölf Teilnehmer waren als Kapitäne angestellt, wobei sich einer der Kapitäne seit zwei Jahren im Ruhestand befand. Die Piloten besaßen Typenzulassungen für A320, A330 und/oder A340. Sieben Piloten gaben an, aktuell für Kurzstrecke eingeteilt zu sein. Fünf der zwölf Piloten besaßen einen Ingenieurshintergrund.

Aufgabe und Versuchsumgebung: Aufgabe der Versuchsteilnehmer war es in acht vorgegebenen Szenarien künstlich generierte Ablagen während eines Anflugs auf dem Gleitpfad zu korrigieren. Im Anschluss an die Versuchsdurchführung waren die Versuchspersonen aufgefordert, einen Wissensfragebogen zum Thema Energiemanagement zu beantworten.

Die Versuche wurden im Festsitz-Forschungssimulator SEPHIR durchgeführt. Das simulierte Flugzeug ist eine VFW614-ATD, welche über ein Flugsteuersystem, ähnlich dem eines modernen Verkehrsflugzeugs, verfügt. Obwohl geringe Unterschiede vorhanden sind, ist der Simulator in Bezug auf Flugeigenschaften und Bedienung einem Airbus A320 sehr ähnlich (für eine detaillierte Beschreibung siehe Müller et al., 2013).

Versuchsplan: Um beobachten zu können, ob Piloten Ablagen mithilfe des Prinzips des Energieaustauschs korrigieren, wurde ein 2 (Gruppe) \times 4 (Szenario) Versuchsplan entwickelt. Der erste Faktor war ein between-subjects-Faktor, der über eine post-hoc-Unterteilung der Stichprobe in zwei Gruppen mit unterschiedlichem Wissen über Energiemanagement operationalisiert wurde. Die Einteilung geschah anhand der Ergebnisse des Wissenstests in einem Debriefing-Fragebogen (siehe unten). Durch die Auswertung der Antworten des Fragebogens wurde die Stichprobe in eine Gruppe von Piloten mit explizitem Wissen zu Energiemanagement aufgeteilt und eine weitere mit Piloten, die dieses Wissen gar nicht oder nur fehlerhaft repräsentiert hatten. Bei dem zweiten Faktor handelte es sich um einen Messwiederholungsfaktor, in Form von vier verschiedenen Ablageszenarien, die im Folgenden genauer beschrieben werden.

Innerhalb der Ablageszenarien sollten die Versuchsteilnehmer eine künstlich generierte Höhendifferenz zum 3°-ILS-Gleitpfad und gleichzeitig eine Geschwindigkeitsablage zur Landegeschwindigkeit (115 kt) korrigieren. Der Referenzstartpunkt der Szenarien wurde dabei auf 2000 ft über Grund festgelegt. Das Flugzeug war zu dem Zeitpunkt bereits für den Endanflug komplett konfiguriert. Die Szenarien in Tab.1 wurden so berechnet, dass die Korrektur der Ablagen einzig durch den Austausch von potentieller und kinetischer Energie möglich ist, ohne die Gesamtenergie beeinflussen zu müssen. Anders ausgedrückt, können die Piloten die Korrektur bei diesen Szenarien ohne Schubanpassung ausschließlich durch Verwendung des Höhenruders ausgleichen. Durch Auswertung der Kommando Größen des Schubhebels kann so erkannt werden, ob die Piloten das Potential zum Energieaustausch erkennen und in diesen Situationen auch anwenden. Unterschiede zwischen den Szenarien wurden hinsichtlich der Größe der Ablagen und des mit den Ablagen verbundenen Risikos realisiert. Ablageszenario 1 besitzt mit einer Höhendifferenz von -200 ft und Geschwindigkeitsdifferenz von +18,2 kt die größten Ablagen. Ablageszenario 4 gelangt durch die Geschwindigkeitsdifferenz von -10 kt gerade an die Toleranzgrenze für die niedrigste wählbare Geschwindigkeit. Die Szenarien 2 und 3 wurden als abgeschwächte Varianten der Szenarien 1 und 4 konzipiert.

Tab.1: Auflistung der Szenarien mit generierten Höhen- und Geschwindigkeitsablagen.

	Höhenablage	Geschwindigkeitsablage
1	-200 ft	+18,2 kt
2	-100 ft	+9,5 kt
3	+50 ft	-5 kt
4	+97,3 ft	-10 kt

Die vier Ablageszenarien wurden von den Versuchspersonen im Wechsel mit vier weiteren Ablagekombinationen geflogen. In diesen zusätzlichen Ablageszenarien ist es nicht möglich die Korrektur ausschließlich durch Energieaustausch durchzuführen. Die Reihenfolge der Szenarien wurde variiert, um Lerneffekte ausschließen zu können. Die vier weiteren Ablageszenarien werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

Für jede Versuchsperson und jedes Szenario wurden die aufgezeichneten Simulatorendaten abgespeichert und aufbereitet. Um eine Aussage zur Güte und zum Umfang des jeweils eingesetzten Energieaustauschs zu machen, wurde die Verwendung des Schubhebels betrachtet. Die Schubhebelstellung wurde durch den Versuchsleiter vor Beginn der Simulation auf den optimalen Wert zur Korrektur der Ablage durch Energieaustausch gesetzt. Deshalb war jede Abweichung zu dieser Startschubhebelstellung, die durch Schubregulation der Piloten herbeigeführt wurde, als Indikator dafür aufzufassen, dass die Piloten bei der Ablagekorrektur nicht allein das Prinzip des Energieaustausches nutzen. Vielmehr war dies ein Hinweis dafür, dass sie aktiv Energie zu- bzw. abführten. Aus dem Verlauf der Da-

ten zur Schubhebelstellung wurde pro durchgeführtem Szenario als abhängige Variable die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) ermittelt. Je größer dieser Wert ist, desto stärker fallen die Abweichungen zur optimalen Schubeinstellung aus und desto stärker hat ein Pilot die Schubregelung zur Ablagekorrektur eingesetzt. Je kleiner die RMSE-Werte desto besser und effektiver wird somit das Prinzip des Energiemanagements bei der Korrektur der Ablagen eingesetzt. Zur Prüfung der o.g. Annahmen wurden die so ermittelten Daten mit einer 2 (Gruppe) \times 4 (Szenario) Varianzanalyse mit Messwiederholungen über den zweiten Faktor (Szenario) analysiert.

Durchführungsdetails: Vor der Durchführung der Versuche wurde den Teilnehmer in einem Briefing die Versuchsaufgaben und der Simulator vorgestellt. In einem Probedurchlauf, vor der eigentlichen Durchführung des Versuchs mit Messaufzeichnung, konnten die Versuchsteilnehmer sich an die Eigenschaften des Simulators und des simulierten Flugzeuges gewöhnen. Dazu wurde ein ILS-Anflug mit Landung auf den Flughafen Frankfurt durchgeführt. Anschließend folgte die Versuchsdurchführung des ebenfalls durchgelaufenen Versuchs, der in Müller et al. (2013) detailliert beschrieben ist.

Im Anschluss an die Aufgaben aus dem ersten Versuch sollten die Piloten acht kurze Szenarien, darunter die vier hier besonders relevanten, abfliegen. Dazu wurde jeweils die Simulation eingefroren und auf die festgelegten Ablagen zurückgesetzt. Der Schubhebel wurde durch den Versuchsleiter jeweils auf den Wert für einen stationären Sinkflug mit 3°-Gleitwinkel zurückgestellt. Bevor die Simulation fortgeführt wurde, bekamen die Versuchsteilnehmer Zeit sich mit der gegebenen Situation vertraut zu machen und auf die Korrektur der Ablagen vorzubereiten. Aufgabe der Piloten war es anschließend bei aktiver Simulation die Ablagen wie im realen Linienflug spätestens bis zu einer Flughöhe von 1000 ft über Grund zu korrigieren.

Im Anschluss an die Versuchsdurchführung im Simulator wurde ein Debriefing-Fragebogen bearbeitet. Dieser war in Interviewform durch die Versuchsteilnehmer zu beantworten. Er dient dazu die mentale Repräsentation des Energieaustauschs zu untersuchen und das Verständnis der Piloten zu diesem Prinzip zu ermitteln. Der für die vorliegende Untersuchung relevante Teil des Fragebogens beinhaltet einen Wissenstest bestehend aus sieben Fragen zum Thema Energiemanagement.

Ergebnisse

Die post-hoc-Unterteilung der Stichprobe in zwei Wissensgruppen geschah anhand der Fragebogenantworten nach folgendem Schema. Die Versuchsteilnehmer, deren Antworten zur Beschreibung des Energiemanagements richtig sind, gehören der Wissensgruppe 1 ($n = 7$) an. Ist mindestens eine der Antworten falsch, wurde der Versuchsteilnehmer der Gruppe 0 ($n = 5$) zugeordnet.

Für eine Versuchsperson fehlten aufgrund defekter Datenaufzeichnung Messdaten zu Ablageszenario 2. Somit wurden alle Daten dieser Versuchsperson in folgenden statistischen Betrachtungen ausgeschlossen. Wissensgruppe 0 reduziert sich dadurch auf $n = 4$ Versuchspersonen.

In der Analyse der RMSE-Daten für die Schubhebelstellung wurde nur der Haupteffekt Szenario signifikant, $F(3, 27) = 10,049$; $p < 0,001$. Weder für den Haupteffekt Gruppe, noch für die Wechselwirkung Gruppe \times Szenario zeigten sich signifikante Effekte (beide $F < 2,0$).

Abb.1 zeigt die Mittelwerte der RMSE aller betrachteten Versuchspersonen für die Energieaustauschszenarien 1 bis 4. Es wird deutlich, dass in Szenarien 2 und 3 stärker auf das Prinzip des Energieaustauschs zur Beseitigung der Ablagen gesetzt wurde, als in den beiden Szenarien 1 und 4. Die Ablageszenarien 2 und 3 unterscheiden sich zu den Szenarien 1 und 4 dadurch, dass die Geschwindigkeits- und Höhendifferenzen geringer ausfallen (siehe Tab.1).

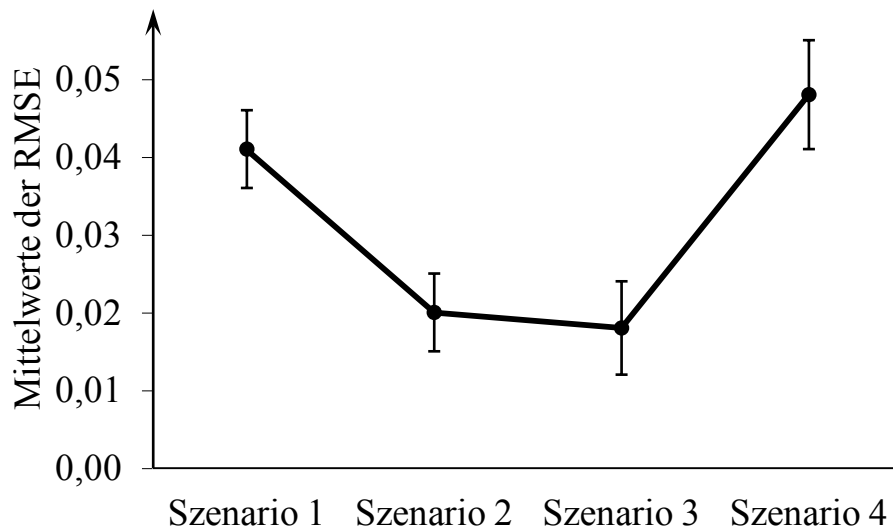


Abb.1: Diagramm der RMSE-Mittelwerte der Versuchspersonen mit Standardfehler über den Szenarien 1 bis 4.

Diskussion

Die Auswertung der Versuche zeigt, dass einige Piloten zwar ein Verständnis für Energiemanagement bei der Flugzeugführung besitzen, dieses Prinzip aber, unabhängig vom Wissen, nicht optimal eingesetzt wird. Die Annahme, nur Piloten, die Wissen bezüglich des Energiemanagements haben, wenden dieses auch an, ließ sich nicht bestätigen. Innerhalb der verschiedenen Ablageszenarien ließen sich jedoch signifikante Unterschiede beobachten, die die dritte Annahme bestätigen. Ablagen mit geringerem Korrekturbedarf wurden vermehrt mit dem Prinzip des Energieaustauschs ausgeglichen. Dagegen zeichneten sich die Szenarien mit größeren Ablagekorrekturen sowie Geschwindigkeitsablagen in sicherheitskritischer Toleranznähe durch stärkeren Einsatz des Schubhebels aus.

Daraus lässt sich schließen, dass auch Piloten mit explizitem Energiemanagementwissen selten das Prinzip des Energieaustauschs optimal anwenden. Insbesondere bei großen Ablagen besteht durch bessere Schnittstellengestaltung Potential zur Ressourcenoptimierung. Die Integration einer zusätzlichen Anzeige zur Darstellung des aktuellen und zukünftigen Energiezustandes würde es Piloten erleichtern die Möglichkeiten der Flugbahnführung besser einzuschätzen. In Kombination mit einer entsprechenden Schulung könnte so die manuelle Steuerung des Flugzeuges energetisch optimiert werden. Für Piloten wäre es damit möglich Korrekturen der Flugbahn nicht alleine durch Vorgaben der Höhen und Geschwindigkeitsänderung zu realisieren, sie können so direkt auf die Änderung der Energiezustände Einfluss nehmen. Beispielsweise wird dadurch ein möglicher Energieaustausch bei Ablagekorrekturen erkennbar oder Hinweise zur energetisch optimierten Schubwahl deutlich.

Energieanzeigen sind heutzutage kaum in der kommerziellen Luftfahrt vorhanden. Allerdings gibt es erste Konzepte die diesen Ansatz verfolgen (siehe Amelink et al., 2005 oder Lambregts et al., 2008). Für zukünftige Studien empfiehlt sich die Wirksamkeit dieser Konzepte zu untersuchen und die erwartete Verringerung der Arbeitsbelastung zu prüfen.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass die hier vorgestellten Ergebnisse nur mit Vorsicht verallgemeinert werden sollten, da die getestete Stichprobe vermutlich wenig repräsentativ für die Gesamtheit aller Verkehrspiloten ist. Dies begründet sich erstens in dem geringen Stichprobenumfang, der für diese Untersuchung zur Verfügung stand, und zweitens in dem unüblich hohen Anteil von Versuchsteilnehmern mit Ingenieurshintergrund.

Ebenfalls sollte nicht unerwähnt bleiben, dass die berechneten Ablageszenarien zwar theoretisch durch reinen Energieaustausch korrigierbar waren, sich aber bei unterschiedlichen Korrekturstrategien Verlustenergien ergeben konnten, die trotz Anwendung des Energieaustauschprinzips durch eine Schubanpassung korrigiert werden mussten. Die RMSE-Werte betreffender Versuchspersonen fallen daher zwar höher als im angenommenen Idealfall aus, sind jedoch im Vergleich zum Verzicht auf das Prinzip des Energieaustauschs deutlich kleiner.

Danksagung

Diese Arbeit wird gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), GZ: LU 1397/3-1, MA 3749/3-1.

Literatur

Amelink, M., Mulder, M., Paassen, M. M. (Rene) van, & Flach, J. (2005). Theoretical foundations for a total energy-based perspective flight-path display. *The*

International Journal of Aviation Psychology, 15(3), 205–231.
doi:10.1207/s15327108ijap1503

Brockhaus, R., Alles, W., Luckner, R. (2011). *Flugregelung* (3rd ed.). Berlin: Springer-Verlag.

Lambregts, T., Rademaker, R., & Theunissen, E. (2008). *A new ecological primary flight display concept*. Paper presented at Digital Avionics Systems Conference (pp. 4.A.1–1 – 4.A.1–20). St. Paul, MN.
doi:10.1109/DASC.2008.4702820

Müller, S., Schreiter, K., & Manzey, D. (2013). *Simulatorstudie zur Ermittlung mentaler Handlungsmodelle von Piloten beim Energiemanagement*. Paper presented at 62. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Stuttgart.

Schreiter, K., Müller, S., & Luckner, R. (2013). *nxControl: Konzept zur Vorgabe-
regelung für die Längsbeschleunigung des Flugzeugs*. Paper presented at 62. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress. Stuttgart.