

MARSPEED – Modellbildung, Identifikation und Echtzeitsimulation des Bewegungsverhaltens eines Bodeneffektfahrzeuges

Björn Kolewe*, Wolfgang Drewelow*, Detlef Dewitz*, Bernhard Lampe*

*Center for Marine Information Systems, Universität Rostock,
D-18051 Rostock, Germany (e-mail: bernhard.lampe@uni-rostock.de)

Zusammenfassung: Die Modellierung des Bewegungsverhaltens von Bodeneffektfahrzeugen für den Einsatz in Trainingssimulatoren lässt sich mit den gängigen Methoden und Einschränkungen nur schwer umsetzen. Für diese Aufgabe wurde daher ein modulares, skalierbares und nichtlineares Mehrpunktmodell für die Echtzeitsimulation entwickelt, welches Simulationsszenarien auch außerhalb der Betriebsgrenzen erlaubt und eine Vielzahl von Umweltparametern berücksichtigt. Die Modellierung erfolgt über eine Aufteilung des Fahrzeuges in funktionelle Teilkörper und eine Berechnung der Kräfte und Momente unter Berücksichtigung der lokalen Zustände und Umweltparameter und in Anlehnung an die Blattelemente-Theorie. Die Parameter des Modells wurden zum großen Teil über experimentelle Identifikationsmessungen an einem Versuchsträger im Maßstab 1:5 ermittelt. Das modulare Konzept erlaubt eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Anpassung des Modells und damit eine Erhöhung der Genauigkeit, die es auch für den Test von Regleransätzen und –strukturen prädestiniert. Die programmtechnische Umsetzung des Bewegungsmodells wurde unter MATLAB/Simulink realisiert.

1 Einleitung

Mit der Fertigungsreife der ersten zivilen Bodeneffektfahrzeuge, ist auch ein Bedarf nach der Ausbildung von Fahrzeugführern für solche ultraschnellen Fahrzeuge entstanden und damit für einen echtzeitfähigen Trainingssimulator, in dem das Steuern dieser Fahrzeuge gefahrlos erlernt werden kann. Für solche Trainingssimulatoren ist ein Bewegungsmodell notwendig, welches alle Bewegungszustände und –phasen unter realistischen Umweltbedingungen abbilden kann und auch außerhalb der Betriebszustände, z.B. in Crash- oder Gefahrenszenarien, ein Bewegungsverhalten liefert, welches dem realen Verhalten des Fahrzeuges weitestgehend entspricht.

Bodeneffektfahrzeuge bewegen sich physikalisch gesehen sowohl als Wasser- als auch als Luftfahrzeug und ihr Bewegungsverhalten ist stark von Parametern und Effekten abhängig, die in herkömmlichen Bewegungsmodellen stark vereinfacht oder gar nicht abgebildet werden. Dieser Umstand machte die Entwicklung eines Simulators notwendig, welcher für die Simulation der unterschiedlichen Bewegungsarten des Bodeneffektfahrzeuges gleichermaßen geeignet ist und in dem ein Bewegungsmodell integriert ist, welches die relevanten

Abhängigkeiten von Zuständen und Umweltparametern ausreichend genau nachbildet. Die Modellierung und Parametrisierung dieses Bewegungsmodells und dessen Einbindung in einen Trainingssimulator sind Thema dieser Arbeit.

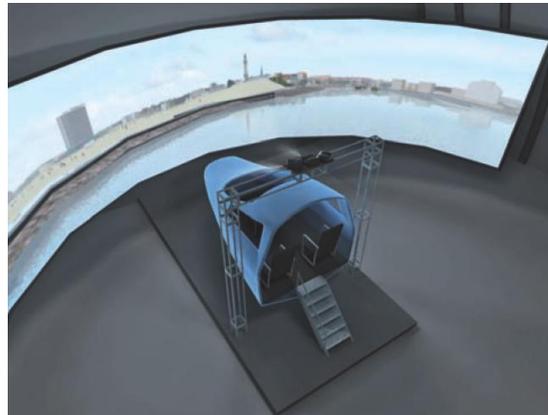


Abbildung 1: Konzeptstudie des Trainingssimulators mit physischem Cockpit

2 Bodeneffekt und Bewegungsarten von modernen Bodeneffektfahrzeugen

2.1 Bodeneffekt

Als Bodeneffekt bezeichnet man ein physikalisches Phänomen, welches ein umströmter Körper in Bodennähe erfährt und je nach Form des Körpers zusätzlichen dynamischen Auftrieb sowie eine Abnahme des Strömungswiderstandes erzeugen kann. Wird ein Auftriebsprofil von vorne angeströmt, so bildet sich an seiner Unterseite ein Überdruck und an seiner Oberseite ein Unterdruck aus. Aus der Druckdifferenz ergibt sich die Auftriebskraft, die auf den Tragflügel wirkt. Abbildung 2 zeigt ein typisches Tragflügelprofil und stellt die Druckunterschiede bei dessen Umströmung farblich dar.

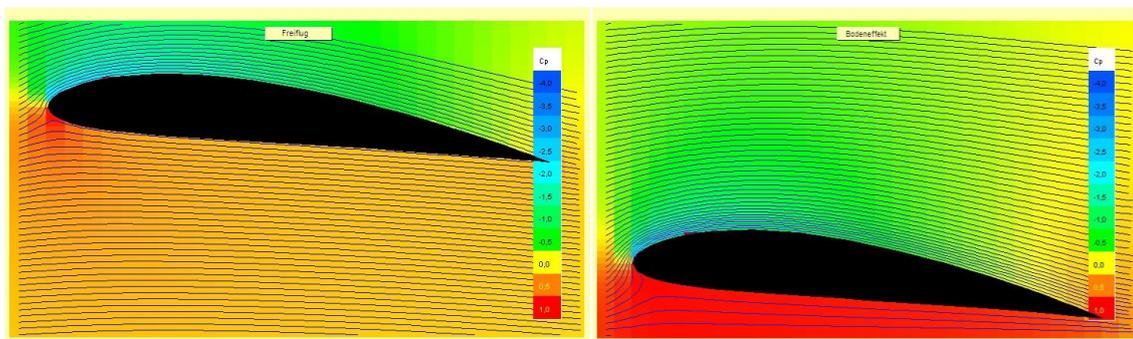


Abbildung 2: Druckverteilung am frei angeströmten Tragflügelprofil und in Bodennähe

Nähert sich das Profil dem Boden an, so wird die Luft unter dem Tragflügel gestaut und in dessen Folge erhöht sich der Überdruck an der Profilunterseite und somit auch die Druckdifferenz bzw. die Auftriebskraft des Profils. Weiterhin ändert sich die Druckverteilung und der Auftriebsschwerpunkt wandert nach hinten (Abbildung 2, rechts).

Die Erhöhung der Auftriebskraft ist dabei maßgeblich von der relativen Höhe h , dem Verhältnis der Profiltiefe c zum Bodenabstand H , abhängig (Gleichung 1). Daher wird dieser Mechanismus auch als profiltiefendominierter Bodeneffekt bezeichnet.

$$h = \frac{H}{c} \quad (1)$$

Betrachtet man einen realen, dreidimensionalen Tragflügel, so entsteht an den Flügelenden eine Ausgleichsströmung zwischen den Druckunterschieden an Ober- und Unterseite. Dieser Druckausgleich erzeugt Wirbelschleppen, welche Energie binden und somit einen Widerstandserhöhung zur Folge haben. (Abbildung 3)

Nähert sich der Tragflügel dem Boden an, so können sich die Wirbelschleppen nicht vollständig entwickeln und der durch den Auftrieb induzierte Widerstand verringert sich.

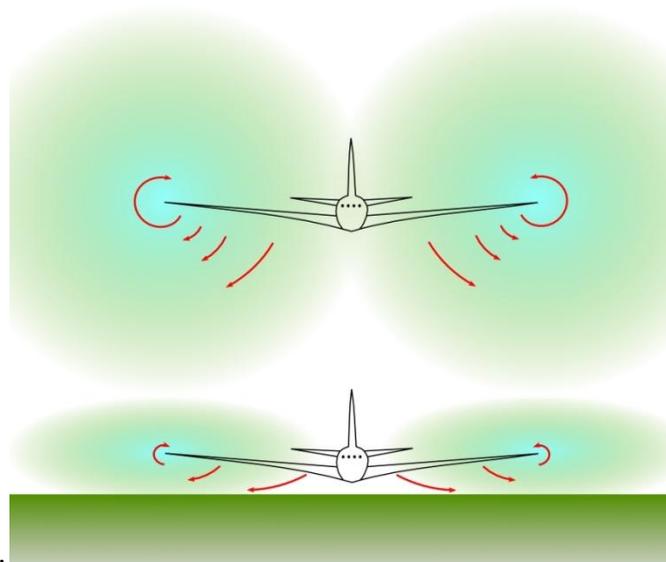


Abbildung 3: Wirbelbildung am realen Tragflügel im Freiflug und in Bodennähe

2.2 Bewegungsarten von Bodeneffektfahrzeugen

Beide Effekte werden bei aktuellen Bodeneffektfahrzeugen zur Effizienzsteigerung genutzt. Durch die Erhöhung des Auftriebes können größere Nutzlasten transportiert werden und die Verringerung des induzierten Widerstandes ermöglicht die Reduzierung der Antriebsleistung (Schlichting, Truckenbrodt 2001). Da diese Effekte nur dicht über dem Boden auftreten und eine ebene, hindernisfreie Oberfläche Voraussetzung für den Betrieb ist, sind heutige Bodeneffektfahrzeuge ausschließlich als Wasserfahrzeuge konzipiert. Das

Bewegungsverhalten kann bei solchen Fahrzeugen in drei Arten unterteilt werden, welche durch die Geschwindigkeiten und die auftretenden Kräfte charakterisiert sind.

Displacement Mode: In diesem Mode bewegt sich das Bodeneffektfahrzeug mit geringer Geschwindigkeit wie ein normales Schiff. Es treten kaum aerodynamische Kräfte auf und hydrodynamische Auftriebskräfte sind sehr gering. (Abbildung 4)



Abbildung 4: Bodeneffektfahrzeug im Displacement Mode

Skimming Mode: Das Fahrzeug gleitet mit hoher Geschwindigkeit auf dem Wasser. Es treten sowohl hydrodynamische als auch aerodynamische Auftriebs- und Widerstandskräfte auf. Hydrostatische Kräfte sind nur zu einem geringen Teil vorhanden. (Abbildung 5)



Abbildung 5: Bodeneffektfahrzeug im Skimming Mode

Flare Mode: Das Fahrzeug bewegt sich ohne Wasserberührung mit hoher Geschwindigkeit und im Wirkungsbereich des Bodeneffekts. Es treten ausschließlich aerodynamische Kräfte auf. (Abbildung 6)



Abbildung 6: Bodeneffektfahrzeug im Flare Mode

3 Modellbildung

Betrachtet man die Einschränkungen und Annahmen der klassischen Ansätze der Modellbildung für Schiffe und Flugzeuge, wird schnell deutlich, dass das Bewegungsverhalten eines Bodeneffektfahrzeugs damit nur unzureichend modelliert werden kann. Insbesondere die Vernachlässigung von lokalen Höhendifferenzen unterhalb der Ausdehnung des Fahrzeuges und die vereinfachte oder vernachlässigte Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Boden sind als einschränkende Bedingungen bei der Modellbildung für ein Bodeneffektfahrzeug nicht geeignet.

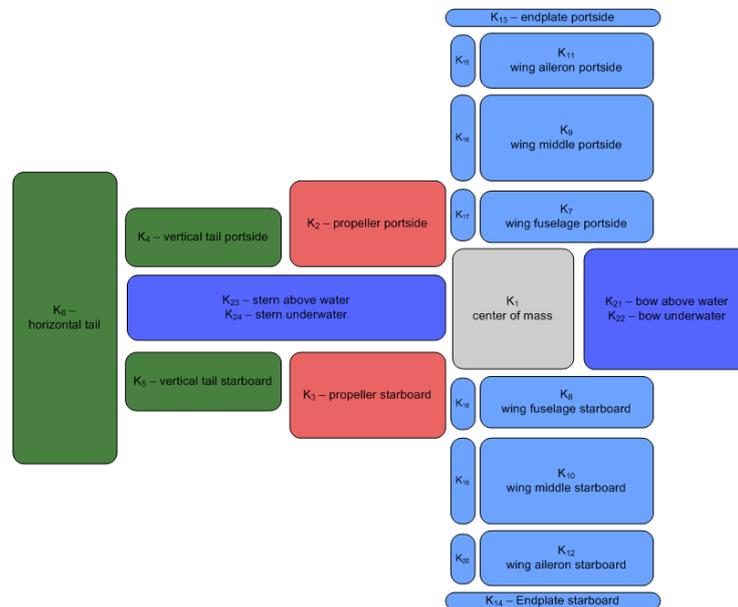


Abbildung 7 Aufteilung des Fahrzeuges in Teilkörper

Es wurde daher ein Mehrpunkt-Modellansatz gewählt, bei dem das Fahrzeug in funktional getrennte Teilkörper K_i , mit jeweils einem definierten Kraftangriffspunkt \vec{r}_i , aufgeteilt wurde (Abbildung 7). Für alle Teilkörper K_i erfolgt eine getrennte Modellierung der auftretenden Kräfte unter Berücksichtigung der unterschiedlichen lokalen Bedingungen. Dieses Konzept erlaubt eine modulare Erweiterbarkeit des Modells, sowohl bei einer weitergehenden

Strukturierung in kleinere Teilkörper, als auch bei der Modellierung der dort auftretenden Kräfte.

3.1 Dynamik

Das Fahrzeug wurde als starrer Körper angenommen und die Kirchhoffschen Bewegungsgleichungen zur Beschreibung der Dynamik angewendet, Fossen (1995).

$$\vec{F} = \frac{d \mathbf{m}\vec{V}}{dt} + \vec{\omega} \times \mathbf{m}\vec{V} \quad (1)$$

$$\vec{M} = \frac{d\mathbf{J}\vec{\omega}}{dt} + \vec{\omega} \times \mathbf{J}\vec{\omega} + \vec{V} \times \mathbf{m}\vec{V} \quad (2)$$

Die Gesamtkraft \vec{F} berechnet sich aus der Summe der an den Teilkörpern auftretenden Teilkräfte \vec{F}_i und das Moment \vec{M} aus den Teilkräften und ihren Angriffspunkten \vec{r}_i bezogen auf den Masseschwerpunkt.

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i \quad (3)$$

$$\vec{M} = \sum_i \vec{r}_i \times \vec{F}_i \quad (4)$$

Nach Integration der Gleichung (2) und (3) ergibt sich für die Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit in körperfesten Koordinaten:

$$\vec{V} = \mathbf{m}^{-1} \left(\mathbf{m}_0 \vec{V}_0 + \int_0^t \left(\left(\sum \vec{F} \right) - \vec{\omega} \times \mathbf{m}\vec{V} \right) dt \right) \quad (5)$$

$$\vec{\omega} = \mathbf{J}^{-1} \left(\mathbf{J}_0 \vec{\omega}_0 + \int_0^t \left(\left(\sum \vec{M} \right) - \vec{V} \times \mathbf{m}\vec{V} - \vec{\omega} \times \mathbf{J}\vec{\omega} \right) dt \right) \quad (6)$$

Mit den Transformationsmatrizen \mathbf{M}_{ek} und \mathbf{R}_{ek} ergeben sich die Position und die Lagewinkel im erdfesten Koordinatensystem zu:

$$\vec{P} = \vec{P}_0 + \int_0^t \mathbf{M}_{ek} \vec{V} dt \quad (7)$$

$$\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_0 + \int_0^t \mathbf{R}_{ek} \vec{\omega} dt \quad (8)$$

3.2 Berechnung der Kräfte und Momente

Die Berechnung der hydrostatischen, hydrodynamischen und aerodynamischen Einzelkräfte erfolgt auf Grundlage der Fahrzeuggeometrie, Profilparametern und -beiwerten, physikalischen Koeffizienten und den örtlich an den Teilkörpern auftretenden Geschwindigkeiten der umströmenden Luft und des Wassers sowie der jeweiligen Eintauchtiefen. Die Berücksichtigung der lokalen Zustände der Teilkörper ermöglicht es, den Einfluss von Wellen- und Windfeldern auf das Bewegungsverhalten des Fahrzeuges zu modellieren. Ebenso können induzierte Geschwindigkeiten, Strömungen zwischen den Teilkörpern sowie Verformungen der Tragflächen, welche die Aerodynamik des Fahrzeuges beeinflussen, berücksichtigt werden.

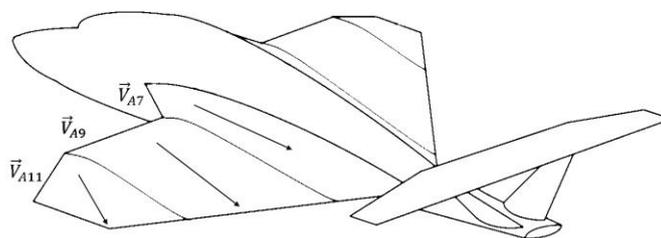


Abbildung 8 Unterschiedliche lokale Fluggeschwindigkeitsvektoren an den Tragflügelabschnitten

In dieser Arbeit wurden die Einzelkräfte in Anlehnung an die Blattelementtheorie (Froude, 1878) über die klassische, beiwertorientierte Auftriebs- und Widerstandsberechnung bestimmt, grundsätzlich können aber beliebige Methoden verwendet werden. Beispielhaft für die Berechnung der Kräfte und Momente der Teilkörper, soll hier das Vorgehen bei der Berechnung der aerodynamischen Auftriebskraft an einem Tragflügelteilstück beschrieben werden:

1. Berechnung des lokalen Fluggeschwindigkeitsvektor \vec{V}_{Ai} des Teilkörpers K_i (siehe Abbildung 8) mit der körperfesten Geschwindigkeit \vec{V} , der erdfesten Windgeschwindigkeit \vec{V}_W , der Transformationsmatrix \mathbf{M}_{ke} , der Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ sowie dem Ortsvektor des Kraftangriffspunktes \vec{r}_i .

Induzierte Geschwindigkeiten werden in diesem Beispiel nicht berücksichtigt, können aber z.B. an Leitwerken, welche im Schubstrahl der Triebwerke liegen, erheblichen Einfluss haben.

$$\vec{V}_{Ai} = \vec{V} - \mathbf{M}_{ke} \vec{V}_W + \vec{\omega} \times \vec{r}_i \quad (9)$$

2. Transformation des Fluggeschwindigkeitsvektors \vec{V}_{Ai} in die Koordinaten des Teilkörpers K_i . Dies erfolgt in diesem Beispiel über die Transformationsmatrix \mathbf{M}_{ik} , welche

über die Drehmatrizen mit dem Anstellwinkel α , dem Pfeilungswinkel φ und dem Winkel der V-Stellung ν des Tragflügelteilstückes gebildet wird.

$$\mathbf{M}_{ik} = \mathbf{M}_\alpha \mathbf{M}_\varphi \mathbf{M}_\nu$$

$\alpha = \text{Anstellwinkel}, \varphi = \text{Pfeilungswinkel}, \nu = \text{Winkel der V - Stellung}$ (10)

$$(\vec{V}_{Ai})_i = \mathbf{M}_{ik} (\vec{V}_{Ai})_k$$
 (11)

3. Berechnung der Auftriebskraft. Mit dem transformierten Flugeschwindigkeitsvektor lässt sich der Betrag der Auftriebskraft F_{Ai} mit dem Auftriebsbeiwert $c_{Ai}(\alpha, \delta)$ des Tragflächenprofils wie folgt berechnen:

$$F_{Ai} = \frac{\rho}{2} (V_{Aix}^2 + V_{Aiz}^2) A_{Ai} c_{Ai}(\alpha, \delta)$$
 (12)

Mit dem Einheitsvektor \vec{e} des Flugeschwindigkeitsvektors erhält man den Vektor der Auftriebskraft $(\vec{F}_{Ai})_i$ in den Koordinaten des Teilkörpers K_i , der senkrecht zum Flugeschwindigkeitsvektor definiert ist. (Abbildung 9)

$$\vec{e} = \frac{(\vec{V}_{Ai})_i}{|(\vec{V}_{Ai})_i|} = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix}$$
 (13)

$$(\vec{F}_{Ai})_i = \begin{pmatrix} |e_z| F_{Ai} \\ 0 \\ -|e_x| F_{Ai} \end{pmatrix}; e_x \geq 0$$
 (14)

$$(\vec{F}_{Ai})_i = \begin{pmatrix} -|e_z| F_{Ai} \\ 0 \\ -|e_x| F_{Ai} \end{pmatrix}; e_x < 0$$
 (15)

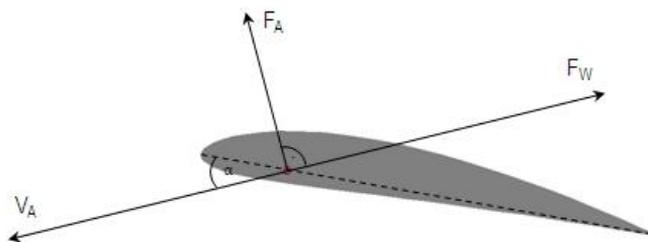


Abbildung 9 Auftriebs- und Widerstandsvektor am Tragflügelprofil

4. Transformation der Auftriebskraft in körperfeste Koordinaten.

Die Rücktransformation der Auftriebskraft \vec{F}_{Ai} in körperfeste Koordinaten erfolgt über die Transponierte der Transformationsmatrix \mathbf{M}_{ik} .

$$\mathbf{M}_{ki} = \mathbf{M}_{ik}^T$$
 (16)

$$(\vec{F}_{Ai})_k = \mathbf{M}_{ki} (\vec{F}_{Ai})_i$$
 (17)

5. Berechnung des Kraftangriffspunktes. Wie oben dargestellt, ändert sich der Auftriebsschwerpunkt des Profils mit der Annäherung an den Boden. (Abbildung 10) Die Berechnung der aktuellen Position des Kraftangriffspunktes \vec{r}_i in Bezug auf den

Masseschwerpunkt erfolgt über den profilspezifischen Koeffizienten k_{aBeff} in Abhängigkeit von der relativen Höhe h .

$$\vec{r}_i = \begin{pmatrix} x_\infty \\ y_\infty \\ z_\infty \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} l_{Beff} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot k_{aBeff} \left(\frac{H_{HK}}{c} \right) \quad (18)$$

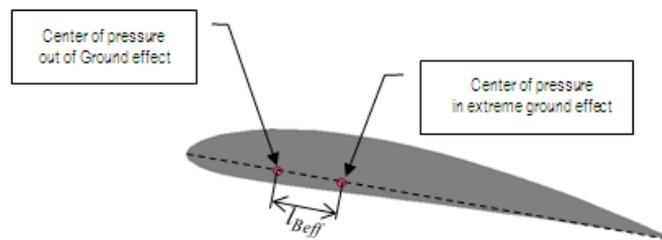


Abbildung 10 Verschiebung des Auftriebsschwerpunktes in Abhängigkeit der relativen Höhe

6. Berechnung des resultierenden Moments. Mit dem auf den Masseschwerpunkt bezogenen Ortsvektor \vec{r}_i des Kraftangriffspunktes und der Kraft \vec{F}_{Ai} ergibt sich das resultierende, körperfeste Moment.

$$\vec{M}_i = \vec{r}_i \times \vec{F}_{Ai} \quad (19)$$

Nach diesem Schema erfolgt die Berechnung sämtlicher aerodynamischer Kräfte. Bei den hydrodynamischen Kräften werden die lokalen Relativgeschwindigkeiten der Teilkörper zum umgebenden Wasser zur Berechnung herangezogen und die hydrostatischen Kräfte werden in Abhängigkeit der Eintauchtiefe bestimmt. Die Schubkräfte der Propeller wurden in

Prinzip der Berechnung des Multikomponentenmodells



Abbildung 11: Prinzip der Berechnung des Multikomponentenmodells

Abhängigkeit des Fortschrittsgrads im Windkanal gemessen und als Kennlinienfeld integriert. Abbildung 11 zeigt die programmtechnische Umsetzung der Simulationsberechnungen.

4 Implementierung

Um eine Weiterentwicklung des Bewegungsmodells unabhängig vom Entwicklungsstand der Visualisierung, der Steuerkonsole und der Umweltsimulation zu gewährleisten, erfolgte die Umsetzung des Bewegungsmodells in eine echtzeitfähige Simulation mit der xPC-Target-Toolbox unter MATLAB/Simulink als Standalone-Modell mit eigenem Betriebssystemkernel. Die Implementierung ist auf einem Standard-PC lauffähig. Die Kommunikation und der Datenaustausch mit den anderen Komponenten des Trainingssimulators erfolgt asynchron über die Ethernetschnittstelle per UDP. Diese Implementierung ermöglicht auch eine weitergehende Anpassung und Erweiterung des Modells, wie z.B. Änderungen der Abtastrate oder des Integrationsverfahrens, ohne dass Änderungen an der Software des Trainingssimulators notwendig sind.

5 Parametrisierung und Systemidentifikation

Die so geschaffene Modellstruktur wurde an Hand von statischen Versuchen unter anderem im Windkanal, Schubmessungen, Schwimmversuchen und mit Ergebnissen aus dem Schleppkanal parametrisiert. Weiterhin flossen Ergebnisse aus numerischen Simulationen an aerodynamischen und hydrodynamischen Profilen mit ein. Parameter die nicht oder nur unzureichend bestimmt werden konnten, wurde aus Messungen bei realen Testfahrten mit einem 1:5 Modell (siehe Abbildungen 4-6) mit Hilfe von Methoden der Systemidentifikation ermittelt. Dazu wurde für das Versuchsfahrzeug ein umfangreiches Messkonzept entwickelt und implementiert, mit dem das Bewegungsverhalten hochgenau erfasst werden konnte.

Ausgehend von stationären Arbeitspunkten wurden die Reaktionen auf bestimmte Stellsignale erfasst und die Parameter des Modells über Methoden der nichtlinearen Optimierung berechnet. Durch die derzeitige grobe Unterteilung des Unterwasserschiffs zeigt das Bewegungsmodell im Übergang vom Displacement zum Skimming Mode noch große Abweichungen vom realen Verhalten (Abbildung 12). In weiterführenden Arbeiten sollte untersucht werden, ob durch eine weitere Aufteilung des Fahrzeuges in Teilkörper, eine bessere Annäherung an das reale Verhalten erzielt werden kann.

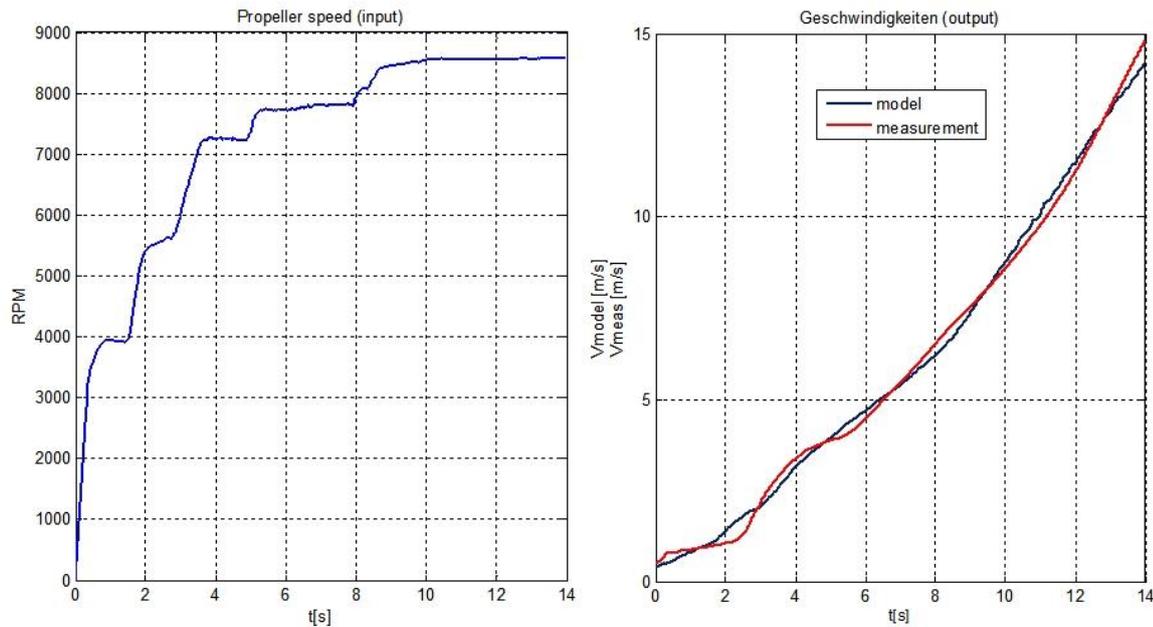


Abbildung 12: Simulierte und gemessene Geschwindigkeit für einen bestimmten Drehzahlverlauf im Displacement- und Skimming-Mode

6 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde das Bewegungsmodell eines Bodeneffektfahrzeuges erstellt, welches die Realität auch außerhalb der normalen Betriebsparameter und in Crashsituationen gut abbildet. Der Mehrpunktansatz zeigte sich als eine sehr flexible und in der Genauigkeit gut skalierbare Methode zur Modellierung des komplexen Bewegungsverhaltens von Fahrzeugen.

Ein Schlüsselproblem bei der praktischen Realisierung und Erprobung von Bodeneffektfahrzeugen ist die Vermeidung von Situationen, die bei der systembedingten Bodennähe zu einer großen Gefährdung des Fahrzeugs führen. Ein Schwerpunkt der nachfolgenden Arbeit soll daher die Unterstützung des Fahrzeugführers in den Phasen des Starts, der Landung sowie die Steuerung des Fahrzeugs per Fahrerassistenzsysteme im Reiseflug und die Vermeidung von kritischen Situationen durch ein umfassendes Mess- und Regelungssystem werden.

Die Möglichkeit mit dem hier vorgestellten Bewegungsmodell das komplexe nichtlineare Bewegungsverhalten des Fahrzeugs zu simulieren, bietet eine gute Möglichkeit verschiedene Regleransätze und -strukturen gefahrenfrei zu entwickeln und zu testen

Literatur

Brockhaus, R.(2001) *Flugregelung*, Springer Verlag Berlin

Fossen, T.I. (1995), *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd Chichester

Dubs, F, *Aerodynamik der reinen Unterschallströmung*, Birkenhäuser Verlag Basel

Schlichting, Truckenbrodt, (2001), *Aerodynamik des Flugzeuges*, Springer Verlag Berlin

Rozhdestvensky, K.V. (2000), *Aerodynamics of a Lifting System in Extreme Ground Effect*, Springer Verlag Berlin

Hoerner S.F, (1958), *Fluid-Dynamic Drag* , Published by the Author, New Jersey

Wieselsberger, C., (1921), *Über den Flugwiderstand in der Nähe des Bodens*, Zeitschrift für Flugtechnik und Motorluftschiffahrt, 1921, Nr.10

Puls, D.(2009): *Manuskript: Physikalische Grundlagen zum Bewegungsverhalten von BEF Typ Seafalcon* Rostock, (unveröffentlicht)

SEEMANNSCHAFT 3: Schiffe und Manöver. Transpress Verlag für Verkehrswesen, Berlin, 3.Aufl., 1987