ABSCHLUSSBERICHT PROMOTIONSVORHABEN

Entwicklung eines hydropneumatischen Schwungradspeichersystems für Windenergieanlagenrotoren

10 JUNE 2021

LAURENCE ALHRSHY

Inhalt

Einführung 2

Forschungsergebnisse 3

1. Development of a Flexible Lightweight Hydraulic-Pneumatic Flywheel System for Wind Turbine Rotors 3

2. Implementation of Variable Blade Inertia in OpenFAST to Integrate a Flywheel System in the Rotor of a Wind Turbine 6

Ausblick 9

Literaturverzeichnis 9

Einführung

Ziel des Promotionsvorhabens ist die Weiterentwicklung eines Systems, durch welches Windenergieanlagen (WEA) einen Beitrag zur Systemträgheit leisten und Schwingungen in den Rotorblättern und im Turm einer WEA beeinflusst werden.

Seit einigen Jahren wird am Institut für Windenergietechnik (WETI) der Hochschule Flensburg ein hydraulisch-pneumatischer Schwungradspeicher im Rotor einer WEA entwickelt, der das Ziel verfolgt einen Beitrag zur Systemträgheit zu leisten [1] und gleichzeitig die unerwünschten Schwingungen der WEA Komponenten zu vermeiden [2].

Die Entwicklung des Schwungradsystems ist gemeinsam mit der Firma HYDAC Technology GmbH so weit fortgeschritten, dass eine Weiterentwicklung auf Komponentenebene durchgeführt werden konnte. Kern dieser Weiterentwicklung richtet sich nach der Anwendung von Leichtmaterialen bei der Herstellung von den Kolbenspeichern des Schwungradsystems. Die bisher vorgesehenen Speicher für das Schwungradsystem sind überwiegend aus Stahl und Aluminium gefertigt [3]. Um den Einfluss der stationären Massen der Speicherkomponenten auf die Lasten der WEA zu minimieren, ist es sehr wichtig diese Massen so gering wie möglich zu halten. Deshalb hat sich der Optimierungsfokus auf den Stahlmantel des Speicherzylinders gerichtet, welcher einen enormen Beitrag zum gesamten Gewicht des Speichers leistet. HYDAC stellt bereits heute Leichtbauspeicher für die Luftfahrt- und die Fahrzeugindustrie her. Allerdings müssen die Leichtbauspeicher für die Anwendung in WEAs für größere Verschiebevolumen entwickelt werden. Um das zu erreichen, hat HYDAC Leichtbaukolbenspeicherprototypen mit relativ großem Volumen gebaut, dessen Zylinder ausschließlich aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) besteht. Allerdings müssen die Kolbenspeicher nicht nur leicht, sondern auch flexibel sein, um in Rotorblättern von WEA eingebaut werden zu können. Das liegt daran, dass die Rotorblätter von WEA im Betrieb durch die aerodynamischen Kräfte stark verbogen werden. Das heißt, wenn ein Kolbenspeicher nah der Blattspitze im Blatt eingebaut werden soll, sollte er sich mit der Blattbiegung ebenfalls verbiegen dürfen. Verbiegung von Kolbenspeichern ist jedoch nach derzeitigem Stand der Technik nicht erlaubt, weil dabei der Kolben verklemmt und undicht wird. Um das Problem zu lösen wird im Rahmen dieses Promotionsvorhabens ein Kolbenspeicher entwickelt, der sowohl leicht als auch flexibel ist [4].

Um die Auswirkung der Gewichtreduktion der flexiblen Speicher auf die mechanischen Lasten der WEA zu quantifizieren, wurden Lastsimulationen der WEA mit flexiblem Schwungradspeicher durchgeführt. Allerdings können die bisher durchgeführten Lastsimulationen das Schwungradsystem nur im geladenen oder entladenen Zustand berücksichtigen [5]. Das dynamische Verändern des Ladezustandes des Schwungradspeichers ist während der Lastsimulation nach derzeitigem Stand nicht möglich. Diese Beschränkung liegt daran, dass kein derzeit am Markt verfügbares Lastsimulationstool in der Lage ist, das Massenträgheitsmoment und die Steifigkeiten der Rotorblätter während der Simulation verändert werden können. Solche umfangreichen Erweiterungen des Lastsimulationstools würden erfordern, den Quelltext des Programmes umfangreich zu ändern. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieses Promotionsvorhabens untersucht, wie der Quelltext von dem Lastsimulationsprogramm OpenFAST geändert werden kann, um das dynamische Verhalten des Schwungradsystems implementieren zu können. OpenFAST ist ein Open-Source WEA Lastsimulationstool, welches von dem National Renewable Energy Laboratory in den USA entwickelt wurde [6].

Forschungsergebnisse

Aus dem dreiviertel Jahr der Promotionsförderung können die Forschungsergebnisse in zwei Veröffentlichungen zusammengefasst werden:

1. Development of a Flexible Lightweight Hydraulic-Pneumatic Flywheel System for Wind Turbine Rotors

Dabei wurde eine Lösung für die Verbiegungsproblematik des Leichtbaukolbenspeichers diskutiert. Um das Problem zu lösen hat HYDAC in Zusammenarbeit mit dem WETI einen Kolbenspeicher entwickelt, der sowohl leicht als auch flexibel ist. Diese besonderen Eigenschaften des Kolbenspeichers werden erreicht durch die Umwicklung eines dünnwandigen Metallrohrs (dem sogenannten Liner) mit Kohlefasern in verschiedenen Wickelrichtungen (siehe Abbildung 1). Durch diese Konstruktion ist sichergestellt, dass der Zylinder des Kolbenspeichers sowohl die Leichtigkeit als auch die gewünschten mechanischen Eigenschaften gewährleisten kann, auch wenn er verbogen wird.

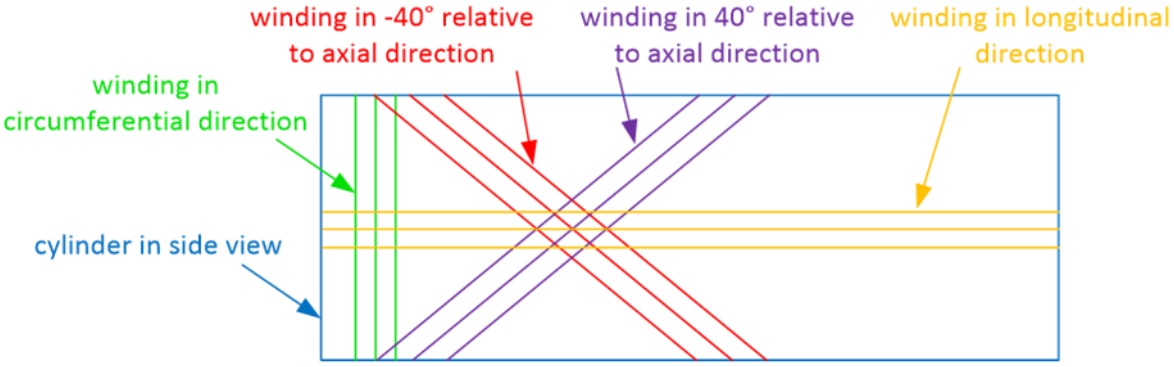

Abbildung 1: Qualitative Darstellung der verschiedenen Wickelrichtungen um den Metallliner bei der Herstellung von dem flexiblen kohlefaserverstärkten Kunststoff (CFK) (die dargestellten Winkeln sind nur zur Erläuterung des Umwickelungskonzepts) [4]

Damit der Kolben in einem verbogenen Zylinder nicht klemmt, muss er ebenfalls flexibel ausgeführt werden. Das wird erreicht, indem der Kolben aus drei flexibel miteinander verbundenen Scheiben besteht. Die Scheiben sind mit einem Dichtring am Umfang des Spaltes zum Liner abgedichtet (siehe Abbildung 2). Dieser neuartige Kolben kann sich an die Biegungen des Kolbenspeichers anpassen.

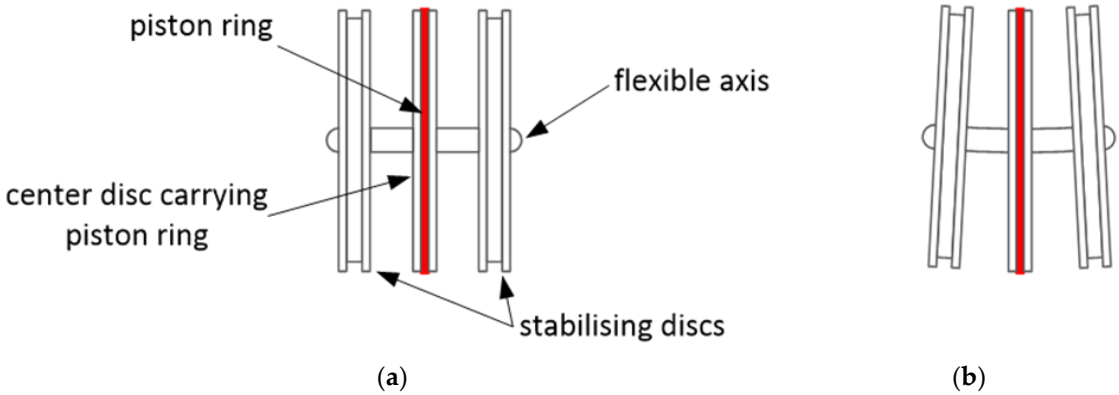

Abbildung 2: Flexibler Kolben (a) gebogener Zustand (b) umgebogener Zustand [4]

Um die Auswirkung der Gewichtreduktion der flexiblen Kolbenspeicher auf die mechanischen Lasten der WEA zu quantifizieren, sind Lastsimulationen der WEA mit dem konventionellen

Schwungradspeicher, mit dem flexiblen Schwungradspeicher und ohne den Schwungradspeicher durchgeführt worden. Diese Simulationsergebnisse wurden zum Vergleich von drei Speicherkonfigurationen erstellt [3]. Der Lastenvergleich der drei ausgewählten Speichertypen I, IV, und VI zeigt, dass durch den Einsatz der flexiblen Speicher sowohl die Erhöhung der Extremlasten (siehe Abbildung 3) als auch die Erhöhung der Ermüdungslasten (siehe Abbildung 4) an allen WEA Komponenten geringer ist, als die Erhöhungen durch den Einsatz des konventionellen Schwungradspeichers. Das führt dazu, dass beim Einsatz von flexiblen Schwungradspeichern keine Notwendigkeit zu Strukturverstärkungen weder an Rotorblättern noch am Turm besteht.

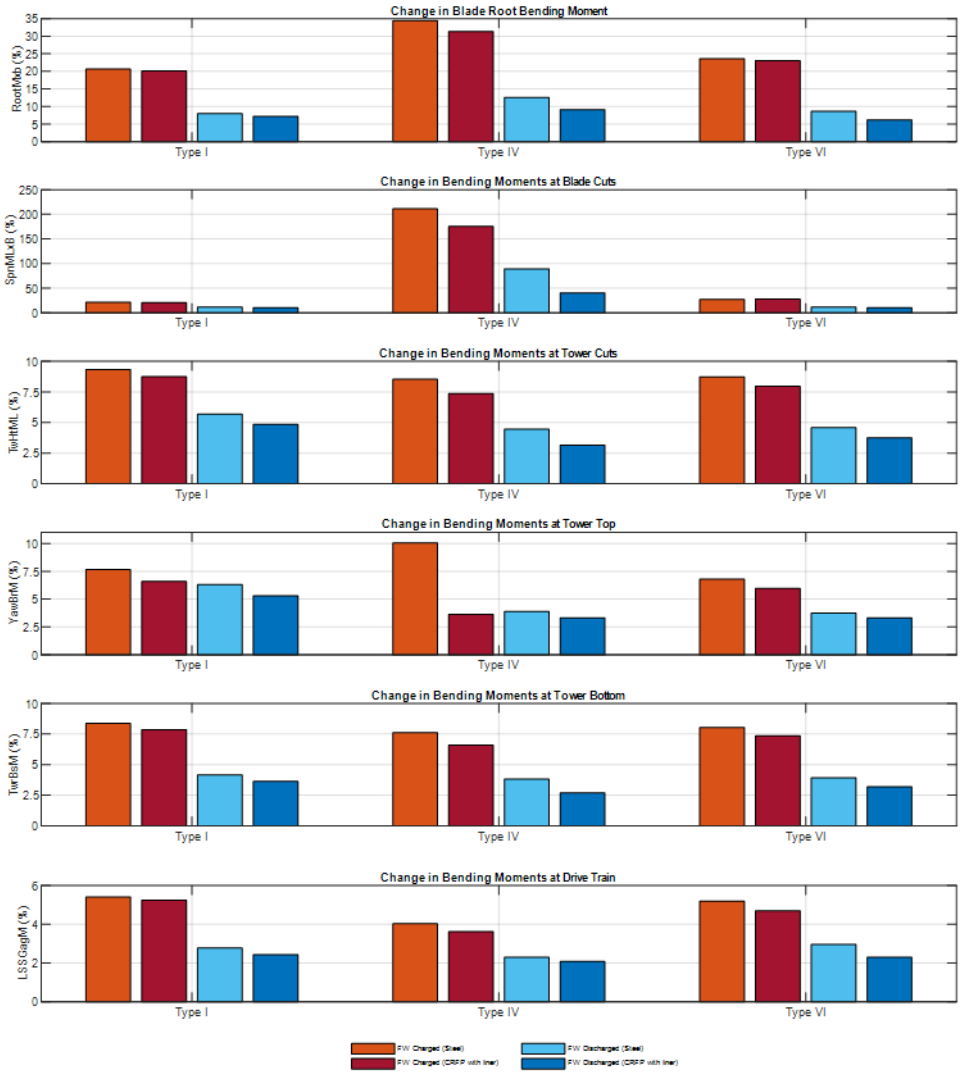

Abbildung 3: Vergleich der Änderung der Extremlasten (von oben nach unten) von Biegemoment an Blattwurzel, Biegemoment an Blattausschnitten, Biegemoment am Turmkopf, Biegemoment am Turmfuß und Biegemoment am Triebstrang zwischen dem Stahlkolbenspeicher und dem CFK flexiblen Kolbenspeicher für das Schwungradsystem Type I, IV, und VI im geladenen (rot) und entladenen (blau) Zustand, beide in Bezug auf die Extremlasten der originalen Windenergieanlage ohne das Schwungradsystem [4].

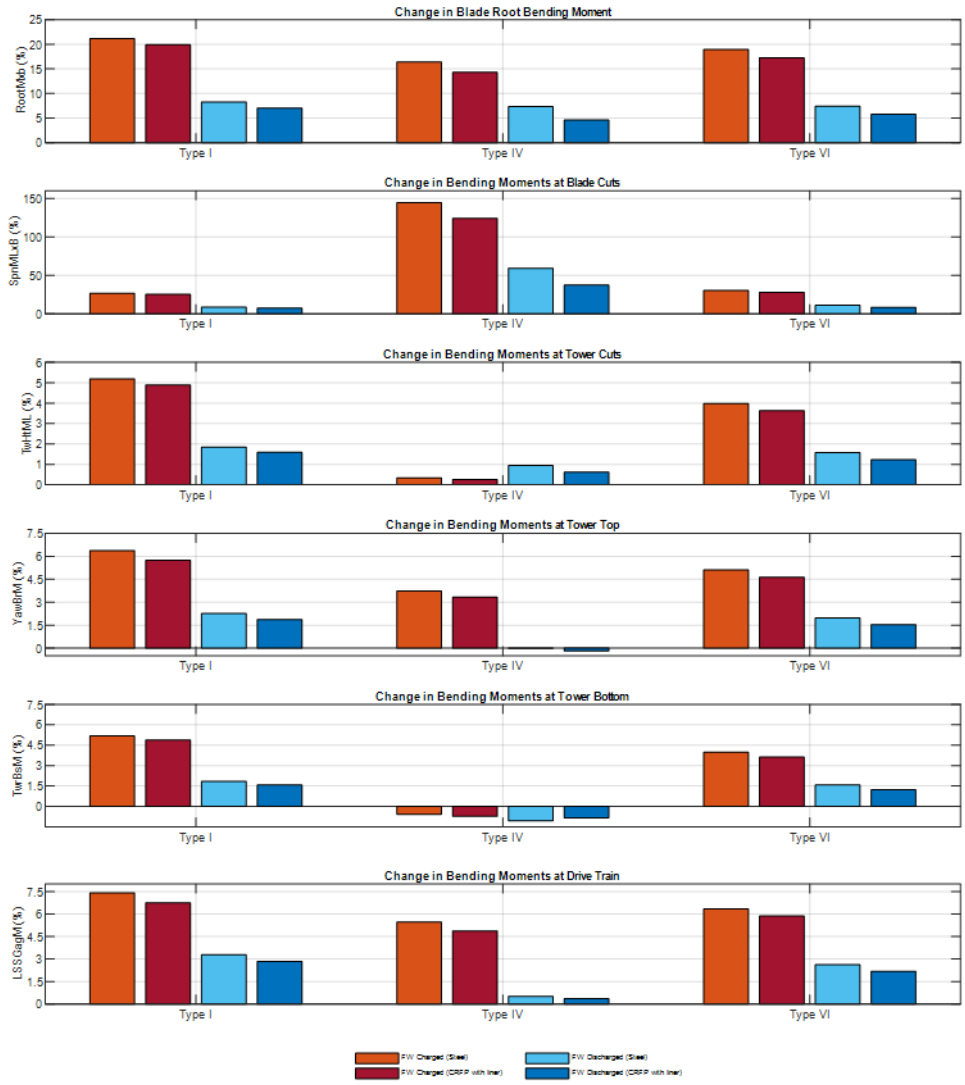

Abbildung 4: Vergleich der Änderung der Ermüdungslasten (von oben nach unten) von Biegemoment an Blattwurzel, Biegemoment an Blattausschnitten, Biegemoment am Turmkopf, Biegemoment am Turmfuß, und Biegemoment am Triebstrang zwischen dem Stahlkolbenspeicher und dem CFK flexiblen Kolbenspeicher für das Schwungradsystem Type I, IV, und VI im geladenen (rot) und entladenen (blau) Zustand, beide in Bezug auf die Ermüdungslasten der originalen Windenergieanlage ohne das Schwungradsystem [4].

2. Implementation of Variable Blade Inertia in OpenFAST to Integrate a Flywheel System in the Rotor of a Wind Turbine

Einer der wichtigsten Einsätze des Schwungradsystems ist die Bestimmung vom Schwingungsverhalten der Windenergieanlagenkomponenten. Diese Bestimmung passiert durch die dynamische Änderung der Massenträgheitsmomente der Rotorblätter. Nach aktuellem Stand der Technik ändern die Rotoren von WEA ihre mechanischen Eigenschaften nicht, während der Betriebszeit. Deshalb sind aktuelle Lastsimulationstools zur Berechnung von mechanischen Lasten von WEA nicht in der Lage, das Verhalten von WEA mit integriertem Schwungradspeichersystem zu simulieren. Aus diesem Grund wird in dieser Veröffentlichung erklärt, wie das Lastensimulationstool OpenFAST angepasst wird, um WEA Rotoren mit variabler Massenträgheit implementieren zu können. Der öffentliche Zugang des Quellcodes von OpenFAST macht dieses Lastensimulationstool sehr praktisch bei der Implementierung vom Schwungradsystem. Außerdem ist OpenFAST eine kostenlose und gut dokumentierte Software. Die angestrebte Softwareerweiterung hat eine vielfältige Einsatzmöglichkeit im Zusammenhang mit der Trägheitsänderung von WEA Rotoren während ihres Betriebs: Zum Beispiel bei Unwuchten von Rotorblättern, beim atmosphärischen Eiszuwachs auf den Rotorblättern, bei smart blades, usw. Die Implementierung von den variablen Blatteigenschaften erfolgt durch einen Algorithmus, der den Implementierungsvorgang in drei Schritte diskretisiert. Die iterative Darstellung dieser drei Schritte ist als Flussdiagramm in Abbildung 5 gezeigt. Im ersten Schritt wird die gesamte Blattmasse in die Anzahl der Blattelemente unterteilt. Dabei werden die Blattelementmassen definiert und gleichzeitig Zeitabhängig gemacht. Das sorgt dafür, dass die Blattelementmassen in jedem Zeitschritt aufgerufen werden können. Die gesamte Blattmasse sowie die Elementanzahl werden anhand der Eingangsparameter festgelegt. Der erste Schritt wird nur einmal bei der Initialisierung der Simulation durchgeführt. Anschließend werden im zweiten Schritt die Blattelementmassen anhand des Schwungradzustands variiert. Der Schwungradzustand wird durch den Faktor „charge-index-factor“ bestimmt. Dieser Faktor ermittelt wie viel Fluid wo und wann verschoben werden soll. Zum Schluss werden im Schritt drei die Parameter, die von der Blattelementmasse abhängig sind, aktualisiert. Schritt zwei und drei werden für jeden Zeitschritt aufgerufen, solang der Schwungradzustand sich ändert. Das aus dem Schwungrad resultierende Drehmoment T_FW [8] ist in Abbildung 6 dargestellt. Abbildung 6 zeigt ein Simulationsszenario für verschiedene Ladezustände des Schwungradsystems. Um den Effekt des Schwungraddrehmoments auf das Verhalten der WEA und vor allem auf die Rotordrehzahl deutlicher zu zeigen, wird die WEA unter konstanten Windbedingungen mit deaktiviertem Steuerungssystem und ohne die aerodynamischen Effekte simuliert. Damit kann deutlicher gezeigt werden, dass das Laden und Entladen des Schwungradsystems zu Entschleunigung bzw. Beschleunigung der Rotordrehzahl führen kann.

Um den Einfluss des Schwungradsystems auf das Schwingungsverhalten der Windenergieanlagenkomponenten zu veranschaulichen, wird in Abbildung 7 ein Simulationsszenario für eine WEA mit Rotorunwucht dargestellt. Die Rotorunwucht ist eines der kritischen Probleme für WEA, weil sie zu Reduktion der Betriebszeit von WEA führt, und im schlimmsten Fall kann sie erhebliche Schäden für die Windenergieanlagenkomponenten verursachen. Die Ursachen der Rotorunwucht können zum Beispiel Eiszuwachs, Blattschäden, ungünstige Fertigungstoleranzen, usw. sein. Deshalb es ist notwendig solche Art von Problemen schnellstmöglich zu korrigieren. Da das Schwungradsystem das Trägheitsmoment von den Rotorblättern innerhalb von wenigen Sekunden ändern kann, bietet dieses System eine optimale Lösung für dieses Problem. Das Simulationsszenario in Abbildung 7 zeigt den Einfluss des Schwungradsystems auf das Windenergieanlagenverhalten unter Rotorunwucht. Die Rotorunwucht ist in diesem Simulationsszenario durch das Hinzufügen von 300 kg

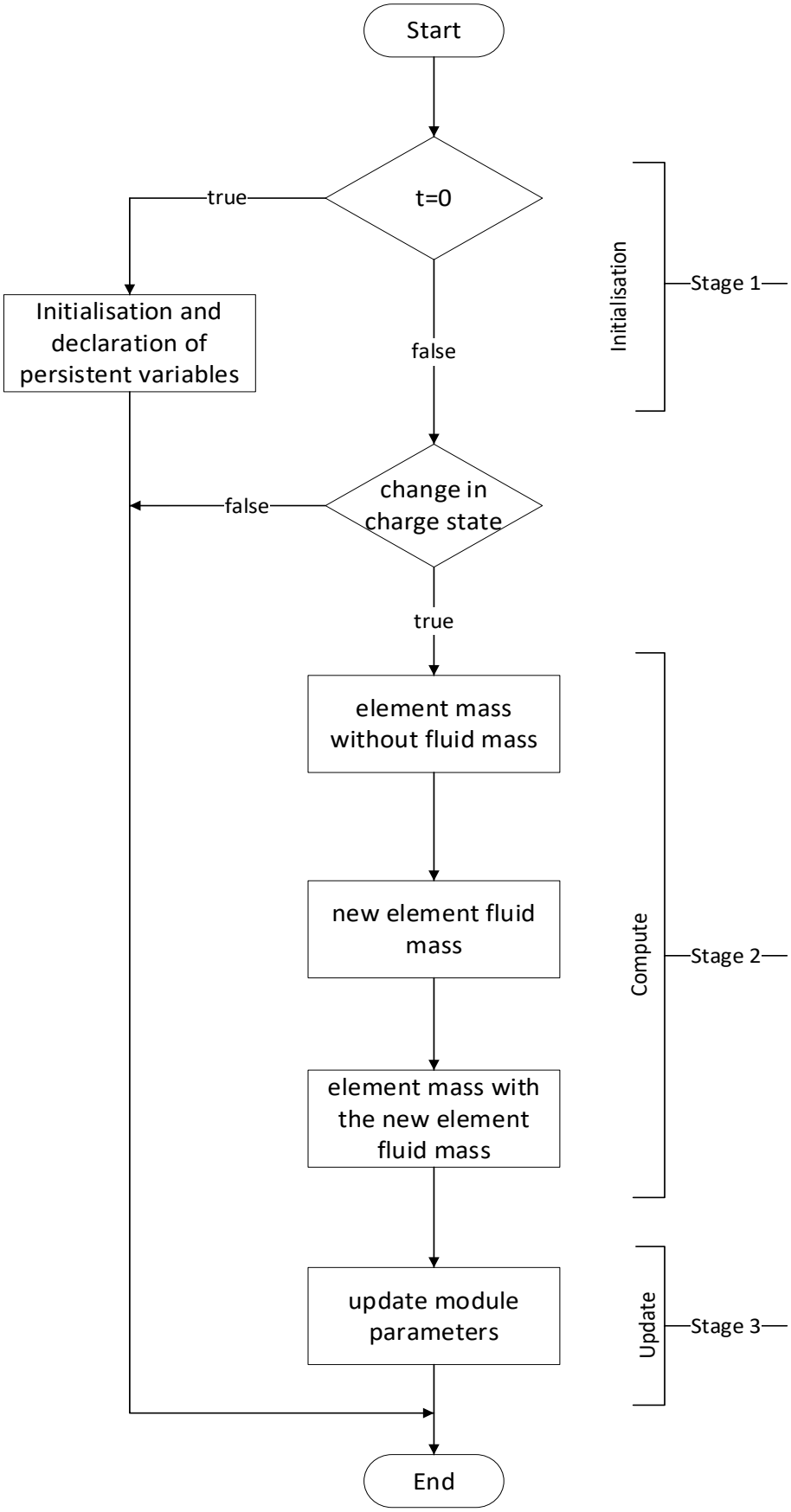

Abbildung 5: Iterativer Prozess zur Initialisierung, Berechnung und Aktualisierung der Blade-Element-Masse [7].

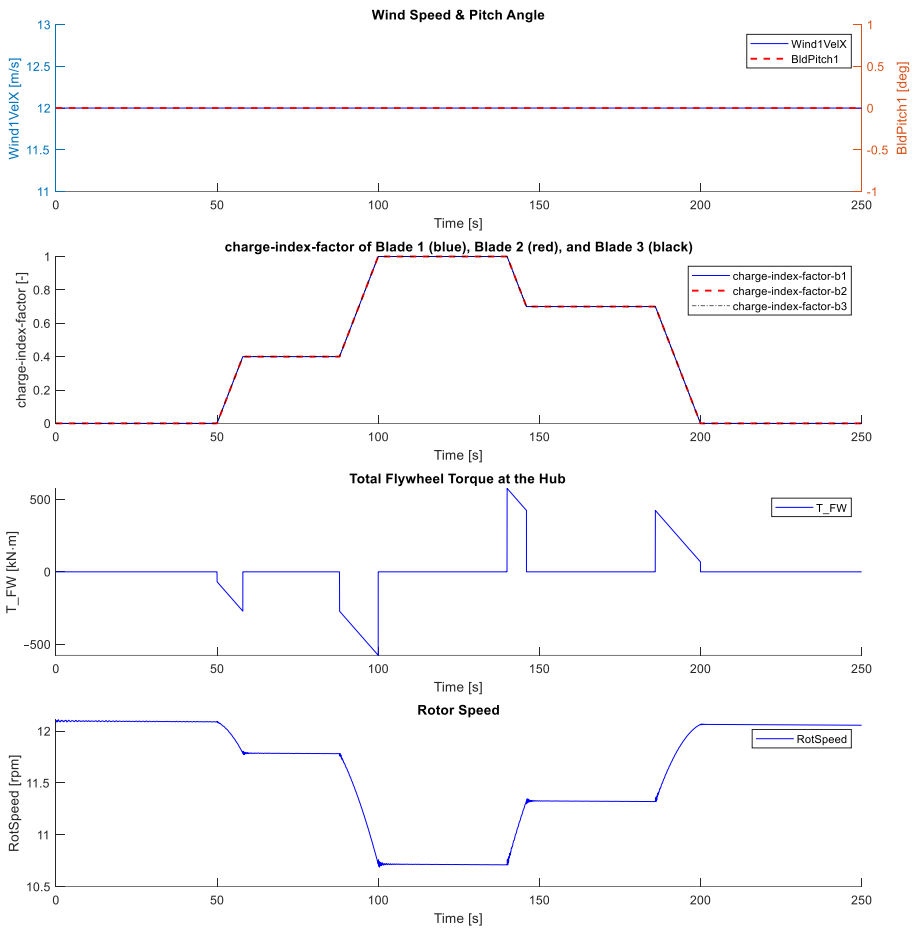

Abbildung 6: Die Auswirkung des Drehmomentes des Schwungradsystems auf die Rotordrehzahl wegen der Änderung der Blattelementmasse [7].

in einem von den drei Blättern am Anfang der Simulation verursacht. Die Massenunwucht ist in Abbildung 7 als 1P Anregung an der Seitenschwingung des Turmkopfs zu sehen. Dabei wird die WEA unter konstanten Windbedingung mit aktiviertem Steuerungssystem und aerodynamische Effekten simuliert. Die Auswirkung des Schwungradsystems auf die Dämpfung der Seitenschwingung des Turmkopfs, TwrTpTDyi, und des seitlichen Drehmoments des Turmkopfs, YawBrMxp, ist deutlich zu sehen in Abbildung 7.

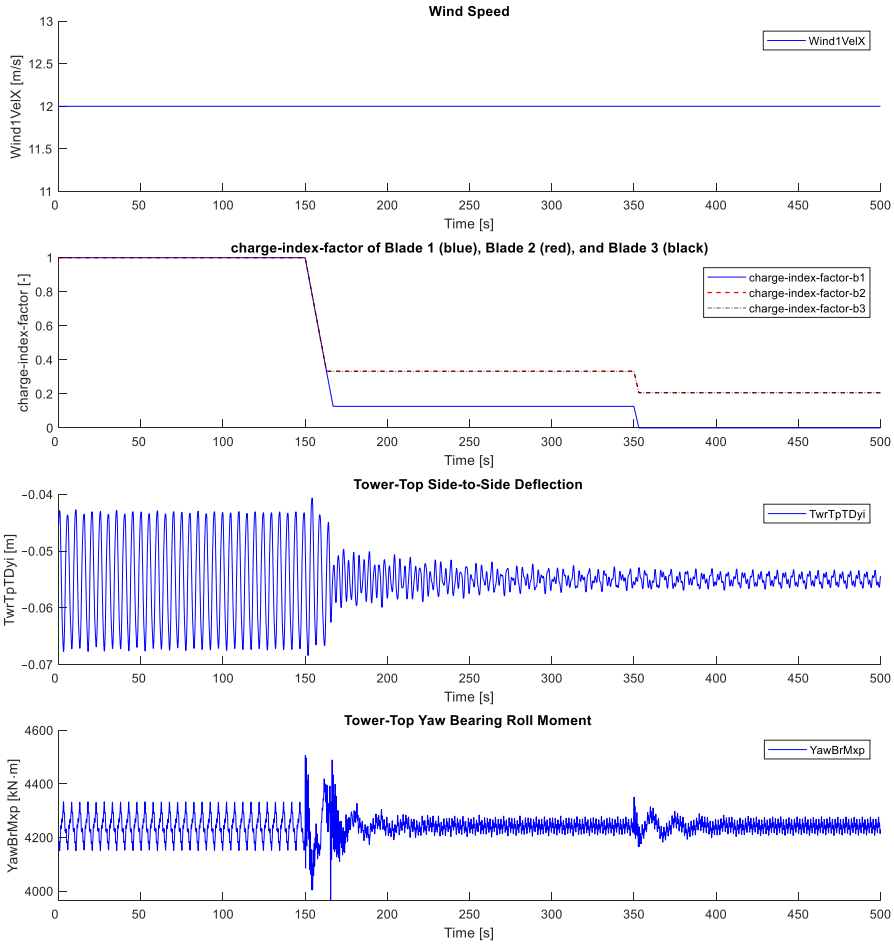

Abbildung 7: Einfluss des Schwungradsystems auf die Seitenschwingung des Turmkopfs bei Rotorunwucht [7].

Ausblick

In den vergangenen neun Monaten vom 01.06.2020 bis zum 28.02.2021 wurden zwei Journale Artikel geschrieben. Beide Veröffentlichungen werden für das Promotionsvorhaben genutzt. Die Promotion läuft weiter im Rahmen eines zweijährigen Forschungsprojekts an der Hochschule Flensburg. Bis Ende des Forschungsprojekts sollte damit die Promotion abgeschlossen werden.

Literaturverzeichnis

1. Jauch, C.; Hippel, S. Hydraulic–Pneumatic Flywheel System in a Wind Turbine Rotor for Inertia Control. *IET Renewable Power Generation* **2016**, *10*, 33–41, doi:10.1049/iet-rpg.2015.0223.
2. Jauch, C. Controls of a Flywheel in a Wind Turbine Rotor. *Wind Engineering* **2016**, *40*, 173–185, doi:10.1177/0309524X16641577.
3. Hippel, S.; Jauch, C.; Ritschel, U. Hydraulic-Pneumatic Flywheel Configurations for Controlling the Inertia of a Wind Turbine Rotor. *Wind Engineering* **2019**, *43*, 114–132, doi:10.1177/0309524X18780386.

4. Alhrshy, L.; Jauch, C.; Kloft, P. Development of a Flexible Lightweight Hydraulic-Pneumatic Flywheel System for Wind Turbine Rotors. *Fluids* **2020**, *5*, 162, doi:10.3390/fluids5040162.
5. Hippel, S.; Jauch, C. Load Analysis of Hydraulic-Pneumatic Flywheel Configurations Integrated in a Wind Turbine Rotor. *Wind Energy* **2019**, *22*, 1190–1202, doi:10.1002/we.2349.
6. National Renewable Energy Laboratory OpenFAST Documentation Available online: https://openfast.readthedocs.io/_/downloads/en/master/pdf/.
7. Alhrshy, L. Implementation of Variable Blade Inertia in OpenFAST to Integrate a Flywheel System in the Rotor of a Wind Turbine. *Energies* **2021**, *14*, 2783, doi:10.3390/en14102783.
8. Jauch, C. A Flywheel in a Wind Turbine Rotor for Inertia Control. *Wind Energy* **2015**, *18*, 1645–1656, doi:10.1002/we.1784.