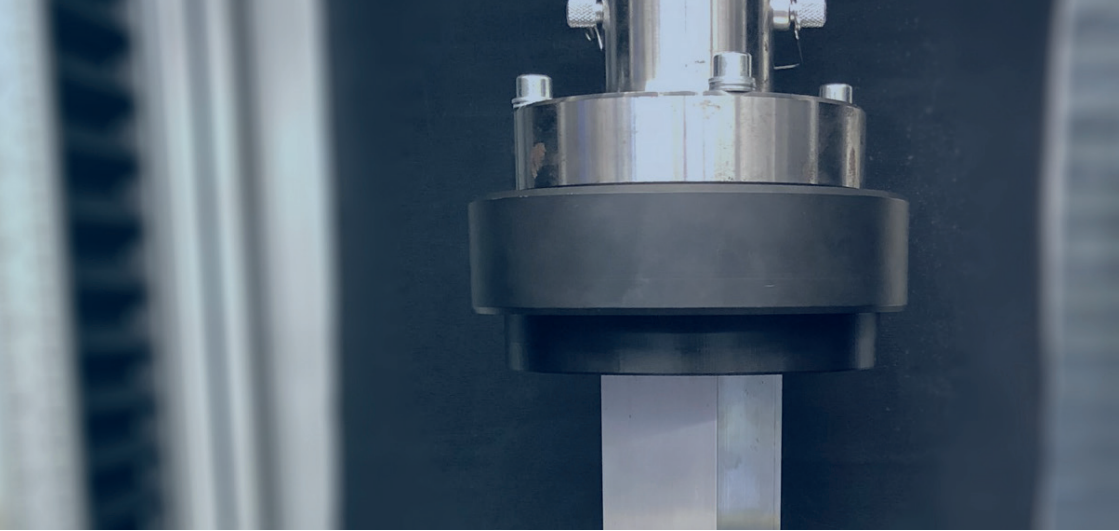




Aachener Berichte aus dem Leichtbau

Versagensverhalten dünnwandiger Profilstäbe unter Drucklast

Martin Anand Lakshmanan



Institut für
Strukturmechanik
und Leichtbau

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

VERSAGENSVERHALTEN DÜNNWANDIGER PROFILSTÄBE UNTER DRUCKLAST

FAILURE OF THINWALLED PROFILE MEMBERS IN COMPRESSION

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Martin Anand Lakshmanan

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann

Tag der mündlichen Prüfung: 04. Dezember 2020

Aachener Berichte aus dem Leichtbau
herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder

Band 3/2020

Martin Anand Lakshmanan

**Versagensverhalten dünnwandiger Profilstäbe
unter Drucklast**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7986-9

ISSN 2509-663X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner insgesamt 6-jährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strukturmechanik und Leichtbau der RWTH Aachen ab 2010 entstanden. Sie ordnet sich in das weite Themenfeld der Strukturauslegung von Luft- und Raumfahrtstrukturen ein, dass seit langer Zeit ein Kernforschungsthema des Instituts ist. Den ersten Berührungspunkt mit diesem Thema gab es schon zu Zeit meiner Diplomarbeit und hat mich anschließend meine komplette Zeit am SLA begleitet.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder. Seit seiner Übernahme der Institutsleitung und der gleichzeitigen Übernahme meiner Betreuung gab es einen regen fachlichen Austausch und eine andauernde Unterstützung und Förderung meiner Arbeit und meiner Person, ohne die ich wohl kaum ans Ziel gekommen wäre. Das diese Art und Weise alles andere als selbstverständlich war, weiß ich aus leidlicher Erfahrung.

Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann für die Übernahme der Koreferats meiner Arbeit bedanken. Der zügige und unterstützende Austausch hat entscheidend zur Beschleunigung der Prozesse beigetragen, die schlussendlich zum erfolgreichen Abschluss der Dissertation geführt haben.

Die insgesamt 10 Jahre zwischen Beginn und Abgabe der Arbeit wären nicht dieselben ohne die Leute, die ich mich während dieser Zeit begleitet haben - fachlich wie persönlich. Das viele Erlebte hat diese Zeit erst zu dem gemacht, was es war: Eine Erfahrung fürs Leben.

Zu nennen sind hier alle Wegbegleiter am Institut selbst. Die intensive Zeit mit vielen unvergesslichen Erlebnissen wird mir immer in Erinnerung bleiben. Die vielen Stunden mit Fachlichem sowie Nicht-fachlichem waren einzigartig.

Weiterhin zu nennen sind alle meine Freunde, ohne deren Unterstützung die Zeit nicht das gewesen wäre, was sie war. Ob es seglerische Aktivitäten, Bastelaktionen oder die Zeit in der Verbindung war, überall sind mir besondere Leute begegnet, die die Zeit der Promotion auch außerhalb der Institutswände zu einer unvergesslichen Zeit gemacht haben.

Nicht zuletzt geht der Dank natürlich an meine Familie und meine Freundin. Ich habe viel Unterstützung und Nachsicht erfahren, in einer Zeit, die für mich nicht immer einfach war, aber die ich auch unter keinen Umständen missen möchte. Sie hat mich zu dem Menschen werden lassen, der ich heute bin, und ich bin froh um jede Erfahrung, die ich sammeln durfte.

Aachen, im März 2021

Martin LAKSHMANAN

Kurzfassung

Das Thema dieser Arbeit ist die Erforschung des Versagensverhaltens dünnwandiger Profilstäbe unter Drucklast sowie die daraus resultierenden Ergebnisse. Dabei liegt der Fokus auf der Abgrenzung des Begriffs Crippling von anderen Versagensmodi und der Beschreibung dieses Modus. Die Ergebnisse stützen sich auf numerische Berechnungen. Zu Beginn der Arbeit werden die derzeit bestehenden Definitionen des Begriffs Crippling beschrieben und vorliegende Auslegungsmethoden vorgestellt. Allen gemein ist die empirische Herangehensweise sowie eine ungenaue Abgrenzung des Crippling zu anderen Versagensmodi.

Basierend auf umfassenden Finite-Element-Berechnungen wird eine genauere Abgrenzung der Versagensmodi dünnwandiger Profile hergeleitet. Der Fokus liegt hierbei auf Profilen, die unter dem Einfluss lokaler Beulen versagen. Die Voraussetzungen sowie die Abläufe für ein derartiges Versagen werden untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse sind hierbei die Einführung zwei verschiedener Versagensfälle, die sich in ihrer Phänomenologie unterscheiden, jedoch beide der bisherigen Definition von Crippling-Versagen genügen. Es handelt sich dabei um das Crippling-Versagen Modus 1, bei dem das Profil-Tragvermögen sofort nach Einsetzen der lokalen Beulen erschöpft ist. Das Versagen wird dabei durch Plastizität auf den Maxima der entstehenden Beulen initiiert. Crippling Modus 2 ist charakterisiert durch ein ausgeprägtes Nachbeul-Tragverhalten. Hierbei wird das Versagen durch eine Kombination aus Druck- und Schubspannungskonzentrationen initiiert. Diese resultieren aus Umlagerungen der äußeren Drucklast im Querschnitt sowie lokalen Verdrillungen der Profilflächen infolge der auftretenden Beulen. Diese Erkenntnisse können als Grundlage einer analytischen Methode zur Beschreibung des Crippling-Versagens dienen. Ein weiteres Ergebnis ist die Beschreibung eines globalen Versagensmodus, der dem Euler-Knicken ähnelt, jedoch durch lokale Beulen beeinflusst wird. Dieser Modus wird durch eine Adaption der Euler-Knickformel einer Auslegung zugänglich gemacht.

Die Arbeit schließt mit einem Entwurf einer Testmethode zur Validierung der Ergebnisse, die aus den FE-Berechnungen gewonnenen wurden. Hierzu werden die Aspekte des Versuchsaufbaus, der Probekörperherstellung sowie der benötigten Messtechnik diskutiert.

Abstract

Within this thesis, the results of research dealing with the failure mechanism of metallic thinwalled profile members in compression are presented. The main focus is on the differentiation of the failure mode Crippling to other failure modes as well as the detailed description of Crippling failure.

First, the current definition of the term Crippling and existing dimensioning methods are presented. All these methods are based on an empirical foundation. A clear differentiation between Crippling and other failure modes is missing. The objective of this thesis is therefore the clear definition of the failure mode Crippling, as well as the description of the process of failure as a basis for a theoretical solution.

Based on finite-element-simulations, a more accurate definition and the detailed analysis of different failure modes are carried out. The failure modes that are in the focus of this thesis all show a local buckling of the profile cross section. Three key results of this thesis can be identified: The first result is the description of a failure mode similar to Euler buckling but under the influence of local buckling. This influence is introduced to an adapted form of the Euler formula, which takes into account the influence of local buckling on the moment of inertia of the profile. The second result is the introduction of two crippling modes for the differentiation of different phenomena. Crippling mode 1 occurs for cross sections, which show plasticity right after the appearance of local buckling. The local buckling load and the crippling load for such cross sections are identical. Crippling mode 2 is characterised by a distinct post-buckling load carrying capacity. The redistribution of the compressive load within the cross section with no appearance of plastic effects at the local buckling load is characteristic. The third result is the detailed description of Crippling mode 2: The failure of profiles under this mode is initiated by a combination of compressive and shear loads, which are both generated by the local buckling. A detailed description for two representative cross sections of this failure mode builds a fundamental understanding of the failure initiation process for crippling.

The thesis closes with a concept for an experimental validation of the findings of the finite element analyses. The concept includes a proposal for a test setup, for sample preparation and the needed test equipment.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Forschung	3
1.2	Fragestellung und Methodik	10
1.3	Arbeitsplan/Gliederung	11
2	Grundlagen	13
2.1	Druckversagensmodi von Strukturen	13
2.2	Druckversagen dünnwandiger Profile	17
3	Numerische Methode	31
3.1	Simulation quasistatischer, nichtlinearer Probleme	31
3.2	Validierung des FE-Modells	47
4	Ergebnisse I - Voraussetzungen für Crippling-Versagen	49
4.1	Ergebnisse für das quadratische Profil	50
4.2	Ergebnisse für das Z-Profil	59
4.3	Erweiterung der Euler-Formel	65
5	Ergebnisse II - Analyse der Schadensinitiiierung bei Crippling-Versagen	69
5.1	Analyse des Quadratprofils	71
5.2	Analyse des Z-Profils	82
5.3	Zusammenfassung	92
6	Zusammenfassung und Ausblick	93
	Anhang	99
A	Plastizitätsdaten AL2024-T3	99
	Literaturverzeichnis	101