

Reihe 18

Mechanik/
Bruchmechanik

Nr. 349

M.Sc. Alexander Grübel,
Paderborn

Effiziente bruchmechanische Herangehensweisen für eine wirtschaftliche Produktentstehung und einen sicheren Bauteilbetrieb

Effiziente bruchmechanische Herangehensweisen für eine wirtschaftliche Produktentstehung und einen sicheren Bauteilbetrieb

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
M. Sc. Alexander Grübel
aus Holzminden

Tag des Kolloquiums: 6. Dezember 2017

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Albert Richard

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Stefan Weihe

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 18

Mechanik/
Bruchmechanik

M.Sc. Alexander Grübel,
Paderborn

Nr. 349

Effiziente
bruchmechanische
Herangehensweisen für
eine wirtschaftliche
Produktentstehung
und einen sicheren
Bauteilbetrieb

VDI verlag

Grübel, Alexander

Effiziente bruchmechanische Herangehensweisen für eine wirtschaftliche Produktentstehung und einen sicheren Bauteilbetrieb

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 18 Nr. 349. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

138 Seiten, 90 Bilder, 16 Tabellen.

ISBN 978-3-18-334918-0, ISSN 0178-9457,

€ 52,00/VDI-Mitgliederpreis € 46,80.

Für die Dokumentation: Bruchmechanik in der virtuellen Produktentstehung – Ermüdungsrisswachstum – bruchmechanischer Festigkeitsnachweis – ersatzmodellbasierte Spannungsintensitätsfaktormittlung – Mixed-Mode-Rissbeanspruchung – Nutzung vorhandener Spannungsdaten – effiziente Herangehensweisen – Restlebensdauer

Ermüdungsrisswachstum von Fehlstellen in Folge zyklischer Beanspruchung ist eine häufige Versagensursache von Bauteilen. Die im fehlerstellenfreien Bauteil wirkenden Spannungen sind im Kontext einer modernen Produktentstehung unabhängig von einer bruchmechanischen Untersuchung verfügbar. Deren synergetische Nutzung zur Bestimmung der Rissbeanspruchung mit Hilfe numerischer Methoden ist Hauptthema dieser Arbeit. In der vorliegenden Dissertation werden Herangehensweisen erarbeitet, die vorhandene mehrachsige Spannungsdaten fehlerstellenfreier Bauteile zur Bestimmung der Rissbeanspruchung nutzen. In der Praxis gestaltet sich dadurch die bruchmechanische Bauteilbewertung deutlich effizienter. Die Herangehensweisen basieren größtenteils auf kubischen Ersatzmodellen, wodurch der Modellierungs- und Berechnungsaufwand reduziert wird.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

Dissertation Universität Paderborn

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9457

ISBN 978-3-18-334918-0

VORWORT

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fachgruppe Angewandte Mechanik der Universität Paderborn.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und langjährigem Leiter der Fachgruppe Angewandte Mechanik Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Albert Richard für die Diskussionsbereitschaft, die vielen wertvollen Ratschläge und Anregungen sowie das entgegengebrachte Vertrauen. Die konsequente Förderung hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Dem Direktor der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart, Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Weihe, danke ich für das gezeigte Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats meiner Dissertation. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner (Kunststofftechnik Paderborn, Universität Paderborn) sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut (Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik, Universität Paderborn) für die Mitarbeit in der Promotionskommission.

Für die fachliche Unterstützung und die sehr hilfreichen Diskussionen bedanke ich mich außerdem bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunter Kullmer. Ein großer Dank für die kollegiale Arbeitsatmosphäre und die gute Zusammenarbeit gilt weiterhin den derzeitigen und ehemaligen Arbeitskolleginnen und Arbeitskollegen der Fachgruppe Angewandte Mechanik: Frau Dipl.-Medienwirtin (FH) Michaela Brock, Frau Dipl.-Ing. Katharina Dibblee, Frau M. Sc. Lena Risse, Frau Dr.-Ing. Britta Schramm, Herrn M. Sc. Benjamin Bauer, Herrn M. Sc. Jan-Peter Brüggemann, Herrn Dr.-Ing. Alexander Eberlein, Herrn M. Sc. Tintu David Joy, Herrn M. Sc. Sergius Kremer, Herrn Dr.-Ing. Wadim Reschetnik, Herrn Dr.-Ing. Andre Riemer, Herrn M. Sc. Karsten Schäfer und Herrn Dipl.-Ing. Markus Wirxel. Einschließen möchte ich sowohl die engagierten Studien-, Bachelor- und Masterarbeiter/-innen als auch die studentischen Hilfskräfte.

Abschließend geht ein besonderer Dank an meine Eltern Ulrike und Manfred für ihren uneingeschränkten Rückhalt sowie die Unterstützung auf meinem bisherigen Lebensweg. Gleiches gilt meinem Bruder Carl. Großer Dank gilt außerdem meiner Partnerin Hedda für ihre Zuversicht, viele wertvolle Ratschläge und die notwendige Ablenkung.

Paderborn, im Dezember 2017

Alexander Grübel

Meinen Eltern

INHALTSVERZEICHNIS

Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen.....	VIII
Kurzfassung	XIII
1 Einführung	1
2 Fehlstellen in Bauteilen und Strukturen sowie ihre Bewertung	4
2.1 Wirkung von Rissen und Fehlstellen auf Bauteile	4
2.1.1 Rissbildung.....	4
2.1.2 Rissfortschritt	5
2.2 Beispiele für Rissprobleme unter komplexer Belastung in der Praxis.....	6
2.2.1 Ermüdungsrisswachstum in Rotorwellen von Windenergieanlagen	7
2.2.2 Rissprobleme in der Kurbelwelle von Verbrennungsmotoren	8
2.3 Kraftflussverlauf und Rissbeanspruchungsarten	9
2.4 Spannungsverteilung in der nahen Rissumgebung.....	12
2.4.1 Spannungsverteilung ebener Rissprobleme	13
2.4.2 Spannungsverteilung räumlicher Rissprobleme	14
2.5 Spannungsintensitätsfaktoren	16
2.6 K-Konzept bei Mixed-Mode-Beanspruchung.....	17
2.6.1 K-Konzept bei Single-Mode-Beanspruchung.....	17
2.6.2 K-Konzept bei ebener Mixed-Mode-Beanspruchung.....	18
2.6.3 K-Konzept bei räumlicher Mixed-Mode-Beanspruchung	19
2.7 Ermüdungsrisswachstum bei zyklischer Belastung mit konstanter Amplitude	21
2.7.1 Zusammenhang zwischen Bauteilbelastung und zyklischem Spannungsintensitätsfaktor	21
2.7.2 Rissausbreitung unter zyklischer Beanspruchung	23
2.7.3 Mathematische Konzepte zur Beschreibung der Kennwerte des Ermüdungsrisswachstums	25
2.7.3.1 PARIS-Gesetz	25
2.7.3.2 FORMAN/METTU-Gleichung	25
2.7.3.3 Konzept nach KULLMER	26
2.7.4 Ermüdungsrisswachstum bei Mixed-Mode-Beanspruchung.....	26
2.8 Regelwerke der bruchmechanischen Bauteilbewertung	28
2.8.1 Vorgehensweise der bruchmechanischen Bauteilbewertung.....	29
2.8.2 Internationale Regelwerke zur bruchmechanischen Bauteilbewertung.....	29
2.8.2.1 FKM-Richtlinie Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis.....	30

2.8.2.2	British Standard 7910.....	30
2.8.2.3	European Fitness-for-Service Network FITNET.....	30
2.8.2.4	ASME Boiler & Pressure Vessel Code.....	31
2.8.3	Kennwertermittlung nach ASTM E 647-08.....	31
3	Bruchmechanische Bauteilbewertung im Kontext der modernen Produktentstehung und -nutzung.....	33
3.1	Virtuelle Entstehung technischer Produkte.....	33
3.2	Bruchmechanische Fragestellungen während Produktentstehung und Bauteilbetrieb.....	35
3.3	Anforderungen an die effiziente bruchmechanische Bauteilbewertung.....	36
4	Verfahren zur Bestimmung der bruchmechanischen Beanspruchungsgrößen.....	38
4.1	Grundlegende Ansätze für Basislösungen.....	38
4.1.1	Analytische Lösungen.....	38
4.1.2	Programmbasierte Bibliotheken.....	39
4.2	Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen.....	40
4.2.1	Grundlagen der Finite-Elemente-Methode.....	40
4.2.2	Ansätze der Finite-Elemente-Methode zur Beschreibung der Gegebenheiten an der Rissspitze.....	42
4.2.3	Spannungsintensitätsfaktorbestimmung auf Basis der Finite-Elemente Methode.....	46
4.2.3.1	Einfaches und modifiziertes Rissschließungsintegral.....	46
4.2.3.2	J -Integral.....	47
4.2.3.3	M -Integral.....	49
4.2.3.4	Verschiebungskorrelationsmethode.....	49
4.2.4	Untersuchungen zur Ergebnisgenauigkeit.....	51
4.3	Automatisierte numerische Simulation des Ermüdungsrisswachstums.....	52
4.3.1	Automatisierte Rissausbreitungssimulationsprogramme.....	53
4.3.1.1	Programmsystem FRANC/FAM.....	53
4.3.1.2	Programmsystem ADAPCRACK3D.....	53
4.3.1.3	Programmsystem FRANC3D.....	54
4.3.2	Untersuchungen zur Ergebnisgenauigkeit.....	54
4.4	Bewertung der Verfahren zur Spannungsintensitätsfaktorbestimmung in Bauteilen und Strukturen.....	59
5	Effiziente bruchmechanische Herangehensweisen für Produktentstehung und Bauteilbetrieb.....	62
5.1	Hauptnormalspannungskonzept.....	64
5.1.1	Idee des Hauptnormalspannungskonzepts.....	64
5.1.2	Anwendbarkeit.....	65

5.2	Mehrachsig halbanalytische Herangehensweise	66
5.2.1	Rissbeanspruchungsrelevante Komponenten des mehrachsigen Spannungsfeldes.....	67
5.2.2	Idee der mehrachsigen halbanalytischen Herangehensweise	68
5.2.3	Anwendbarkeit	70
5.3	Konzept der Schnittspannungsfelder	72
5.3.1	Idee des Konzepts der Schnittspannungsfelder	72
5.3.2	Anwendbarkeit	75
5.4	Konzept der parametrisierten Einflussfunktionen	76
5.4.1	Idee des Konzept der parametrisierten Einflussfunktionen	76
5.4.2	Anwendbarkeit	79
5.5	Bewertung der entwickelten Herangehensweisen	81
5.6	Umsetzung der mehrachsigen halbanalytischen Herangehensweise in ein Berechnungstool.....	84
6	Validierung der Herangehensweisen und Konzepte an Rissen in dreidimensionalen Bauteilen	87
6.1	Kraftwerksbauteil: Y-Siebfilter.....	87
6.2	Motorenkomponente: Kurbelwelle	94
7	Lösungsvorschläge zu praxisrelevanten Fragestellungen der bruchm. Bauteilbewertung.....	102
7.1	Umgang mit nicht-proportionalen Mixed-Mode-Rissbeanspruchungen.....	102
7.1.1	Ungleiche positive R -Verhältnisse	103
7.1.2	Ungleiche negative R -Verhältnisse	105
7.1.3	Statische Mode II-Beanspruchung	107
7.2	Einfluss unscharfer Materialdaten auf die Restlebensdauer	108
7.3	Einfluss anisotroper Materialkennwerte auf die Restlebensdauer bei Mixed-Mode-Rissbeanspruchung.....	110
8	Fazit	113
	Literaturverzeichnis	115

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN

a) Lateinisch

A	Querschnittsfläche
C	Integrationsweg des J -Integrals
C_{FM}	Koeffizient der FORMAN/METTU-Gleichung
C_P	Koeffizient der PARIS-Gleichung
F	Kraft
F_G	Gaskraft, Gewichtskraft
F_i	Knotenpunktkraft
F_{\max}	maximale Kraft
F_{\min}	minimale Kraft
F_{RG}	radiale Hubzapfenkraft
F_{SG}	Hubzapfenkraft
F_{TG}	tangentiale Hubzapfenkraft
G_I, G_{II}, G_{III}	Energiefreisetzungsrates für Mode I, Mode II und Mode III
J	gesamte freigesetzte Energie bei Rissfortschritt
J_I, J_{II}, J_{III}	freigesetzte Energie für Mode I, Mode II und Mode III
\underline{K}	Steifigkeitsmatrix
K_I, K_{II}, K_{III}	Spannungsintensitätsfaktor für Mode I, Mode II bzw. Mode III
$K_{I,a}, K_{II,a}$	Spannungsintensitätsamplitude für Mode I und Mode II
$K_{IC}, K_{IIC}, K_{IIIC}$	Risszähigkeit für Mode I, Mode II und Mode III
$K_{I,m}, K_{II,m}$	Mittelwert des Spannungsintensitätsfaktors für Mode I und Mode II
$K_{I,\max}, K_{I,\min}$	maximaler bzw. minimaler Spannungsintensitätsfaktor für Mode I
$K_{I,zul}$	zulässiger Spannungsintensitätsfaktor
K_C	kritischer Spannungsintensitätsfaktor
K_V	Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_I, \Delta K_{II}, \Delta K_{III}$	zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode I, Mode II und Mode III
$\Delta K_{I,0}, \Delta K_{II,0}$	zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode I und Mode II unter Annahme von $R = 0$
ΔK_{IC}	kritischer zyklischer Spannungsintensitätsfaktor für Mode I

$\Delta K_{I,zul}$	zulässiger zyklischer Spannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{I,th}$	Schwellenwert für Mode I
ΔK_V	zyklischer Vergleichsspannungsintensitätsfaktor
$\Delta K_{V,0}$	zyklischer Vergleichsspannungsintensitätsfaktor unter Annahme von $R = 0$
L	Elementgröße an der Rissspitze
L^*	Verhältnis der Elementgröße an der Rissspitze zur Risslänge
L_S	Submodellelementgröße
M	Moment
M_{Ab}	Abtriebsmoment
M_{An}	Antriebsmoment
N	Lastwechselzahl
$N_{0 \rightarrow I}$	benötigte Lastwechselzahl für definierte Rissverlängerung
N_G	Kolbenseitenwandkraft
R	Verhältnis von minimaler zu maximaler Beanspruchungsgröße
S_E	Sicherheit gegen stabile Rissausbreitung
S_R	Sicherheit gegen instabile Rissausbreitung
\bar{U}	elastische Energiedichte
\underline{U}	Verschiebungsvektor
W_k	Arbeit für Riss schließen
Y_I, Y_{II}, Y_{III}	Geometriefaktoren für Mode I, Mode II und Mode III
$Y_{I,z}$	Geometriefaktor für Mode I in Folge einer Normalspannung σ_z
$Y_{II,zy}, Y_{III,zy}$	Geometriefaktor für Mode II und Mode III in Folge einer Schubspannung τ_{zy}
$Y_{II,zx}, Y_{III,zx}$	Geometriefaktor für Mode II und Mode III in Folge einer Schubspannung τ_{zx}
a, b	Risslänge
a_0	Initialrisslänge
$a_{0,crit}$	wachstumsfähige Anrisslänge
a_C	kritische Risslänge
a_h	Risslänge bei Rissstillstand

Δa	Risslängenzuwachs
b	Halbachse eines elliptischen Risses
c	Spezifische Wärmekapazität
d	Durchmesser
da	Risslängenänderung
da/dN	Rissgeschwindigkeit bzw. Rissfortschrittsrate
dN	Lastwechselzahländerung
ds	Wegkoordinate des J -Integrals
f	Verhältnis von absoluter Ergebnisabweichung zum Thresholdwert
$h_{I,z}$	Einflussfaktor für Mode I in Folge einer Normalspannung σ_z
$h_{II,zx}, h_{III,zx}$	Einflussfaktor für Mode II und Mode III in Folge einer Schubspannung τ_{zx}
$h_{II,zy}, h_{III,zy}$	Einflussfaktor für Mode II und Mode III in Folge einer Schubspannung τ_{zy}
j_z	Verdrehung
m_P	Exponent im PARIS-Gesetz
n, p, q	Exponenten der FORMAN/METTU-Gleichung
$p_{\bar{a}}$	normierter Überdruck
q	Verhältnis von Submodellelementgröße zur globalen Elementgröße
r, φ	Polarkoordinaten
r^*	Abstand zur Rissspitze
t	Zeit, Probendicke
Δt	effektive Elementdicke
\vec{u}	Verschiebungsvektor
u_x, u_y, u_z	Verschiebungen
$\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z$	Rissuferverschiebung
w	Probenbreite
x, y, z	kartesische Koordinaten

b) Griechisch

Φ_I, Φ_{II}	Phasenwinkel für Mode I und Mode II
α	Wärmeausdehnungskoeffizient
γ	Rissöffnungsfunktion der FORMAN/METTU-Gleichung
ε_{ij}	Dehnungstensor
κ	Exponent des Exponentialansatzes nach KULLMER
λ	Koeffizient des Exponentialansatzes nach KULLMER, Wärmeleitfähigkeit
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Dichte, Kerbradius
σ	Spannung
$\vec{\sigma}$	Spannungsvektor
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Hauptspannung
σ_a	Spannungsamplitude bzw. Spannungsausschlag
$\sigma_{B,x}, \sigma_{B,y}, \sigma_{B,z}$	Normalspannungen des Basistensors
σ_{ij}	Komponenten des Spannungstensors
σ_m	Mittelspannung
σ_{\max}	maximale Spannung
σ_{\min}	minimale Spannung
σ_s, τ_s	Schnittspannungen
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normalspannungen in kartesischen Koordinaten
$\sigma_\varphi, \sigma_r, \sigma_z$	Normalspannungen in Zylinderkoordinaten
$\Delta\sigma$	Schwingbreite der Normalspannung bzw. Spannungsschwingbreite
τ	Schubspannung
$\tau_{B,xy}, \tau_{B,yz}, \tau_{B,zx}$	Schubspannungen des Basistensors
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	Schubspannungen in kartesischen Koordinaten
$\tau_{\varphi\varphi}, \tau_{rz}, \tau_{\varphi z}$	Schubspannung in Zylinderkoordinaten
τ_z	nichtebene Schubspannung
φ	Winkel, Kurbelwinkel
φ_0	Rissabknickwinkel

ψ	Rissbeanspruchung des Exponentialansatzes nach KULLMER
ψ_0	Rissverdrehwinkel
ψ_{th}	Schwellenwert des Exponentialansatzes nach KULLMER
ω_I, ω_{II}	Kreisfrequenz für Mode I-, Mode II-Beanspruchungs-Zeit-Funktion.

c) Abkürzungen

ASTM	American Society for Testing and Material
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CT	Compact-Tension
CTSR	Compact-Tension-Shear-Rotation
DIN	Deutsches Institut für Normung
ESZ	ebener Spannungszustand
EVZ	ebener Verzerrungszustand
FEM	Finite-Elemente-Methode
FITNET	Fitness-for-Service-Network
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
FRANC	Fracture Analysis Code
GW	Gigawatt
LEBM	Linear elastische Bruchmechanik
Lw	Lastwechsel
MVCCI	Modified Virtual Crack Closure Integral
SINTAP	Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry

Alle weiteren verwendeten oder hiervon abweichenden Symbole und Bezeichnungen sind im Text erläutert.

KURZFASSUNG

Eine der Ursachen für das Versagen technischer Bauteile ist das Ermüdungsrisswachstum von Fehlstellen in Folge zyklischer Beanspruchung. Im Kontext einer modernen Produktentstehung ist die numerische Simulation von Bauteilen weit verbreitet. Wichtige Daten, wie die im fehlerstellenfreien Bauteil wirkenden Spannungen, sind unabhängig von einer bruchmechanischen Untersuchung auftretender Fehlstellen verfügbar. Deren synergetische Nutzung zur Bestimmung der Rissbeanspruchung durch herkömmliche Anwendung von Rissausbreitungssimulationsprogrammen ist jedoch nicht ohne Weiteres möglich. Neumodellierungen des Ausgangsproblems sind nötig. Vor diesem Hintergrund werden in der vorliegenden Dissertation Herangehensweisen erarbeitet, die vorhandene mehrachsige Spannungsdaten fehlerstellenfreier Bauteile zur Bestimmung der Rissbeanspruchung nutzen. In der Praxis gestaltet sich dadurch die bruchmechanische Bauteilbewertung deutlich effizienter. Die Herangehensweisen basieren größtenteils auf kubischen Ersatzmodellen, wodurch der Modellierungs- und Berechnungsaufwand reduziert wird. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung der Wachstumsfähigkeit von Rissen. Die anhand von Fehlstellen eines im Bereich thermischer Kraftwerke verwendeten Y-Siebfilters sowie einer Kurbelwelle im Verbrennungsmotor durchgeführte Validierung zeigt die Ergebnisgenauigkeit und Effizienz der Herangehensweisen. Außerdem wird deutlich, dass die Wahl der verwendeten Herangehensweise von der Phase im Produktlebenszyklus abhängt.

ABSTRACT

One of the major reasons for failure of technical components is fatigue crack growth of imperfections subjected to cyclic loading. In the context of the modern product development numerical simulations of technical components are widespread. Important information like the effective stress fields obtained from simulation results of defect-free components is available independently of the fracture mechanical assessment of imperfections. The synergetic use of this stress data with conventional crack growth simulation software is complicated so far. Comprehensive modeling is necessary to obtain stress intensity factors for the original problem. Against this background in this paper approaches are presented to determine crack loading using available multiaxial stress data obtained from existing simulation results of uncracked technical components synergistically. They promise an efficient fracture mechanical assessment procedure for industrial applications. The approaches are mostly based on cubical shaped substitute models whereby modelling and computing time are significantly reduced. They are especially suitable for evaluating the growth ability of imperfections. The validation of accuracy and efficiency of the approaches is done successfully by investigating imperfections of a Y-shaped strainer used in thermal power plants as well as in a crankshaft of a combustion engine. Here it is shown that the choice of the proper approach depends on the phase in the product life cycle.

