

Graz University of Technology

Diplomarbeit

**Referenzzyklen zur Validierung
technischer Systeme
am Beispiel landwirtschaftlicher Zugmaschinen**

FTG



Andreas Kerschbaumer

Eingereicht am

Institut für Fahrzeugtechnik

der Technischen Universität Graz

Betreuer AVL: Dr. techn. Johannes Schauer

Betreuer TU Graz: Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Mario Hirz (FTG)

Graz, im März 2014

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

I. Inhaltsverzeichnis

II.	Vorwort und Danksagung	IV
III.	Kurzfassung	V
IV.	Abstract	V
V.	Abkürzungen	VI
A.	Einleitung.....	1
1	Aufgabenstellung.....	1
2	Ziel der Arbeit.....	1
B.	Hauptteil.....	2
1	Theoretischer Hintergrund.....	2
1.1	Verifikation und Validierung	2
1.1.1	Verifikation	2
1.1.2	Validierung	2
1.1.3	Ziele der Verifikation und Validierung.....	2
1.2	Schädigungen	3
1.2.1	Ermüdung (HCF/ LCF)	3
1.2.2	Thermo mechanical fatigue (TMF)	5
1.2.3	Verschleiß	6
1.2.4	Alterung.....	6
1.2.5	Vergiftung.....	7
1.2.6	Ablagerungen.....	7
1.2.7	Kavitation	8
1.3	Schädigungsrechnung.....	9
1.3.1	Pleuellagerverschleiß als Beispiel.....	11
1.4	Qualitäts- und Zuverlässigkeitsziele	13
1.4.1	Zuverlässigkeit	13
1.4.2	Dauerhaltbarkeit.....	14
1.4.3	Zuverlässigkeit vs. Dauerhaltbarkeit	14
1.4.4	Ausfallsverteilung	15
1.5	Was ist überhaupt im Zuge der Erprobung validierbar?	16
1.5.1	Erprobungsprämissen	16
1.5.2	Verschärfende Nebenbedingungen	17
1.5.3	Dauerfestigkeit	17

1.6	Referenzzyklen.....	17
1.7	Arten der Referenzzyklenbestimmung	19
1.7.1	Nutzungsgetriebene Betrachtung.....	21
1.7.2	Schädigungsgetriebe Betrachtung	22
1.8	AVL Load Matrix™	23
1.8.1	System Analyse	25
1.8.2	Applikationen und Zielwerte	27
1.8.3	Testprogramm und Belastungsanalyse.....	28
1.8.4	Auswertung und Optimierung.....	28
1.8.5	Rolle von Referenzzyklen in der AVL Load-Matrix™	29
1.9	Hintergrund zur Validierung von Traktoren.....	30
1.9.1	Applikationsmatrix	31
1.10	Definition benötigter Fahrzeugmessdaten	32
1.11	Zusammenfassung	33
1.11.1	Wir suchen validierungsrelevante Kunden (Definition).....	33
1.11.2	Wie finden wir diese Kunden?.....	33
1.11.3	Parameter zum Beschreiben dieser Kundentypen	33
2	Erstellen eines Traktorreferenzzyklus an einem konkreten Beispiel im Sinne der Schädigung	34
2.1	Technische Beschreibung	34
2.2	Kundenprofile / Applikationsmatrix	35
2.3	System Analyse und benötigte Mess-Kanäle.....	37
2.4	Durchführung der Messungen.....	40
2.4.1	Grünland	41
2.4.2	Bodenbearbeitung.....	43
2.4.3	Transport.....	46
2.4.4	Forst.....	48
2.4.5	Winterdienst	50
2.5	Auswirkungen der unterschiedlichen Anwendungen auf das Belastungskollektiv	50
2.6	Erster Vergleich der Kollektivdaten	51
2.7	Anwenden der Schädigungsrechnung	53
2.8	Ergebnis der Schädigungsrechnung	55

2.9	Analyse der Messdaten	56
2.9.1	Normierung der Ergebnisse	56
2.9.2	Bewertung der Ergebnisse nach dem Ranking	59
2.9.3	Korrelationen.....	61
2.10	Auswählen der Zyklen	66
2.11	Konsequenzen der Zyklusauswahl	68
2.12	Generieren der Referenzzyklen	68
2.12.1	Worst- Case Zyklus.....	69
2.12.2	Best- Case Zyklus.....	72
2.13	Vergleich der beiden Referenzzyklen	75
2.14	Evaluierung der bearbeiteten Einzeltests.....	77
2.15	Flussdiagramm der Prozesskette zur Generierung von Referenzzyklen	81
C.	Schluss	83
1.	Zusammenfassung	83
2.	Ausblick.....	83
VI.	Literaturverzeichnis	IX
VII.	Abbildungsverzeichnis.....	X
VIII.	Tabellenverzeichnis	XIII
IX.	Formelverzeichnis.....	XIV

II. Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU Graz mit dem Ausbildungsschwerpunkt Verkehrstechnik. Die Aufgabenstellung der Arbeit wurde von der AVL List GmbH ausgehändigt und in Kooperation mit dieser durchgeführt.

Besonders möchte ich mich bei Herrn Dr. techn. Johannes Schauer bedanken, der mich seitens AVL betreute und auch in für ihn zeitknappen Perioden mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ein weiterer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Mathias Henn für die Zusammenarbeit bei der Erstellung der Aufgabenstellung, die Mitbetreuung der Arbeit sowie für Anregungen und Diskussionen die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dipl.-Ing Dr. mont. Christian Rehrl sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Hammer, die mich in technischen Belangen unterstützten.

Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Herrn Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Mario Hirz der mich seitens der TU Graz vom Institut für Fahrzeugtechnik betreute und zu jeder Zeit für Fragen und Diskussion bereit war.

Ohne Unterstützung meiner Eltern Alexandra und Christian Kerschbaumer wäre es mir nicht möglich gewesen, mich dem Studium Maschinenbau mit Ausbildungsschwerpunkt Verkehrstechnik an der TU Graz zu widmen.

Ebenso möchte ich mich bei meiner Freundin Johanna Wener bedanken, die mich stets inspirierte und mir helfend zur Seite stand.

Abschließend möchte ich noch all jenen danken, die an dieser Stelle nicht namentlich erwähnt wurden, mich aber dennoch während meines Studiums unterstützt haben.

Graz, im März 2014

Andreas Kerschbaumer

III. Kurzfassung

AVL beschäftigt sich bei der Erstellung von Dauerlaufprogrammen zur Validierung von Systemen, sei es Motor oder Gesamtfahrzeug, unter anderem mit der Generierung von Referenzlastkollektiven oder Referenzzyklen. Im Bereich der On Road Anwendungen, egal ob PKW oder LKW, sind diese Referenzzyklen bereits zu einem hohen Grad untersucht und bekannt. Die große Unbekannte stellen Fahrzeuge aus dem Bereich Off-Road dar. Im Speziellen sind dies landwirtschaftliche Zugmaschinen. Die Herausforderung bei diesen Fahrzeugen ist die Vielfalt der Einsatzmöglichkeiten, wie zum Beispiel Bodenbearbeitung oder Transport. Aufgrund der Komplexität dieser Fahrzeuge beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Generierung von Referenzzyklen am Beispiel eines Traktors. Dabei wird eine Methodik aufgezeigt, wie man über die schädigungsgetriebene Betrachtung effizient zu solchen Zyklen kommen kann. Als Ergebnis soll auf Basis von realen Messdaten eines Traktors der Leistungsklasse von 60 bis 120PS ein Referenzzyklus abgeleitet sowie ein Flussdiagramm als eine Art Arbeitsanweisung erstellt werden. Dieses soll in weiterer Folge dazu dienen, bei künftigen Projekten für ähnliche Fahrzeuge diese Referenzzyklen effizienter zu generieren.

IV. Abstract

AVL deals with the creation of durability programs for the validation of systems, (e.g. motors or complete vehicles), by generating reference load spectrums or reference cycles. For on road applications, whether passenger cars or commercial vehicles these reference cycles have already been evaluated to a high degree and are well understood. The large unknowns are found in off-road vehicles, and in this case in agricultural tractors. The challenges found here results in their diverse range of applications, e.g. from earth cultivation to transport. Due to the complexity in this area, this thesis deals with the generation of appropriate reference cycles for tractors. Thereby a method is presented, which enables a damage driven consideration to efficiently generate said reference cycles. The end result includes a derivation of a reference cycle from real measurement data of a tractor in the 60 to 120 HP load class, and furthermore, a flow diagram to highlight the work procedure of the process. The results of the thesis are able to serve in future projects as an efficient method for the generation of reference cycles for similar vehicle types.

V. Abkürzungen

AP	Ausfallsart-Parameter
BSK	Bauteilschadartkombination
DOC	Diesel Oxidation Catalysator
DoE	Design of Experiments
DPF	Dieselpartikelfilter
Euro 1-6	EU Abgasnorm für PKW
Euro I-VI	EU Abgasnorm für SNF
F	Kraft
FMEA	Failure mode and effects analysis
Fzg	Fahrzeug
HCF	High cycle fatigue
Hz	Hertz als Einheit der Frequenz
Kfz	Kraftfahrzeug
KW	Kilowatt
LCF	Low cycle fatigue
LLK	Ladeluftkühler
LNF	leichtes Nutzfahrzeug (3,5 bis 7,5 t zul. Gesamtgewicht)
M	Drehmoment
n	Drehzahl
NEDC	New European Driving Cycle
p	Druck
PFP	Peak Firing Pressure
PKW	Personenkraftwagen (< 3,5 t zul. Gesamtgewicht)
ppm	Parts per Million
PS	Pferdestärke
PTO	Power Take Off
RF	Raffungsfaktor
SCR	Selective catalytic reduction
SNF	schweres Nutzfahrzeug (> 7,5 t zul. Gesamtgewicht)
SOP	Start of Production
TB	Time Based
Tier 1-4f	Abgasnorm für landwirtschaftliche Zugmaschinen
TMF	Thermo mechanical fatigue
v	Geschwindigkeit
WHTC	World Human Transient Cycle
λ	Ausfallsrate

A. Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit ist in Zusammenarbeit mit der AVL List GmbH und dem Institut für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Graz entstanden.

1 Aufgabenstellung

Hersteller verwenden in der Entwicklung von Verbrennungsmotoren meist standardisierte Erprobungsprogramme am Prüfstand sowie im Fahrzeug, um Systeme oder einzelne Komponenten zum jeweiligen Entwicklungsstand der betroffenen Bauteile bewerten zu können.

Zur Bewertung dieser Dauerläuferprobungsprogramme liefert die Firma AVL ein effizientes Tool, die sogenannte Load MatrixTM. Einen wichtigen Input für dieses Bewertungstool liefern Referenzzyklen. Eine große Herausforderung stellt dabei der Bereich der Off-Road Anwendungen, im Speziellen von landwirtschaftlichen Zugmaschinen, dar. Aufgrund der komplexen Anwendungsmöglichkeiten dieser Fahrzeuge ist es nur schwer möglich, einen einzelnen Referenzkunden zu definieren.

Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit der Darstellung einer möglichen Vorgangsweise zur Bildung von Referenzzyklen für landwirtschaftliche Zugmaschinen. Hierzu wird anfangs der theoretische Hintergrund aufgearbeitet. In weiterer Folge werden für ein konkretes Fahrzeug (Leistungsklasse 60 bis 120 PS) mit Hilfe existierender Messdaten beispielhaft Referenzzyklen ermittelt. Abschließend wird der Prozess in einem Flussdiagramm kurz zusammengefasst und weitere Schlussfolgerungen gezogen.

2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erstellung einer Arbeitsanweisung in Form eines Flussdiagrammes zur Generierung der oben genannten Referenzzyklen. Zusätzlich sollten die Herausforderungen hinsichtlich der Dauerläuferproben bei landwirtschaftlichen Zugmaschinen aufgezeigt werden.

Auf Basis dieser Anweisung können Projekte zu landwirtschaftlichen Zugmaschinen in Zukunft effizienter abgewickelt werden.

B. Hauptteil

1 Theoretischer Hintergrund

1.1 Verifikation und Validierung

1.1.1 Verifikation

Verifikation wird in [1] definiert als das Bestätigen auf Grund einer Untersuchung durch Bereitstellung eines Nachweises, dass festgelegte Forderungen erfüllt worden sind.

Verifikation ist die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde [3]. Vereinfachend gesagt lässt sich diese Definition in die Frage „Ist das Modell richtig?“ fassen. Nach der eigentlichen Bedeutung des Wortes (lateinisch *verificare: wahrmachen*) soll das verifizierte Modell als wahr und korrekt, also fehlerfrei angesehen werden können.

1.1.2 Validierung

Validierung wird in [2] definiert als das Bestätigen auf Grund einer Untersuchung und durch Bereitstellung eines Nachweises, dass die besonderen Forderungen für einen speziellen beabsichtigten Gebrauch erfüllt worden sind.

Validierung ist die kontinuierliche Überprüfung, ob die Modelle das Verhalten des abgebildeten Systems hinreichend genau wiedergeben [3]. Diese Definition lässt sich wiederum in die Frage „Ist es das richtige Modell?“ fassen. Validierung (lateinisch *validus: stark, wirksam, gesund*) ist der Nachweis der Reproduzierbarkeit eines Ergebnisses aus einer beschriebenen Vorgehensweise unter definierten Bedingungen. Je exakter eine Vorgehensweise beschrieben ist (wenige unbekannte Einflussfaktoren), desto sicherer ist es, übereinstimmende Resultate zu erzeugen. Für eine Validierung benötigt man die Beschreibung des Zieles und des Weges. Valide bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Weg wiederholbar zum Ziel führt.

1.1.3 Ziele der Verifikation und Validierung

Verifikation und Validierung haben das Ziel, in einer Studie, in der fehlerhafte Aussagen gewonnen werden könnten, die zu Fehlentscheidungen führen könnten, diese wirksam zu verhindern. Dafür müssen die Verifikation und Validierung sowohl

im Prozess der Modellbildung als auch bei der Nutzung des Modells und in weiterer Folge bei der Auswertung der Simulationsergebnisse angewendet werden. Trifft dies nicht zu, könnten eventuell fehlerhafte Aussagen getroffen werden [3].

1.2 Schädigungen

Da es eine Vielzahl von Schädigungsarten, die zum Bauteilversagen führen, gibt [8], wird im folgenden Kapitel nur eine kleine Auswahl relevanter Schädigungsarten gezeigt. Diese sind:

- High Cycle Fatigue (HCF)
- Low Cycle Fatigue (LCF)
- Thermo Mechanical Fatigue (TMF)
- Verschleiß
- Alterung
- Vergiftung
- Ablagerungen

1.2.1 Ermüdung (HCF/ LCF)

Unter Ermüdung versteht man die Änderungen der Materialeigenschaften, die durch ständig wechselnde kleine Belastungen (zum Beispiel Vibrationen und Schwingungen) verursacht werden, und die im Extremfall mit einem plötzlichen und oft katastrophalen Bruch enden. Entscheidend dabei ist, dass Ermüdung auch eintreten kann, wenn die Amplituden der Schwingungen, und damit auch die im Material auftretenden Spannungen, weit unterhalb der Fließgrenze bleiben, so dass eigentlich nur elastische Verformung vorliegen sollte. Was man beobachtet, wenn man in Ermüdungsexperimenten eine Probe zyklisch verformt, ist eine mit der Zahl der Zyklen kontinuierlich abnehmende Bruchspannung R_m . Trägt man eine gegebene Amplitude der Schwingungsbelastung gegen die Zyklenzahl auf, erhält man die sogenannte Wöhler Kurve (S-N Curve), siehe Abbildung 1-1.

Für viele Werkstoffe ergibt sich ab einer bestimmten Lastspielzahl ein definierter Grenzwert, die so genannte Dauerfestigkeit.

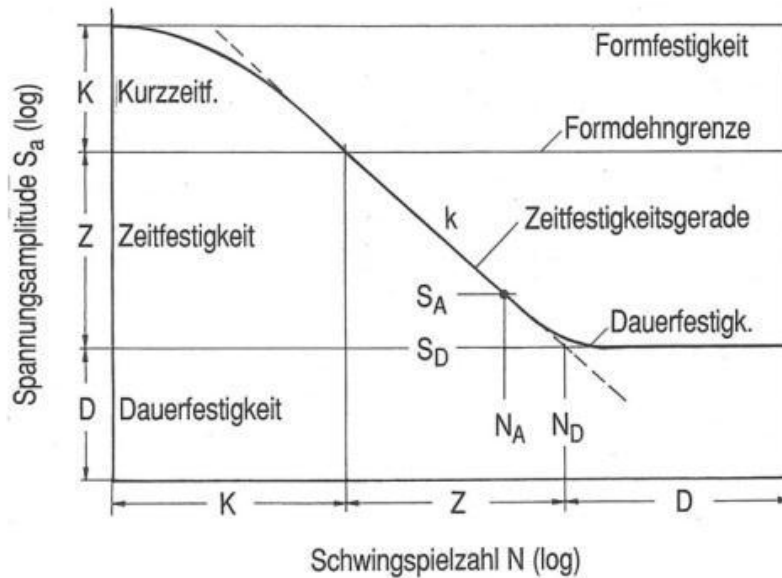


Abbildung 1-1: Kennwerte einer Wöhlerkurve und Abgrenzung der Bereiche Dauerfestigkeit (D), Zeitfestigkeit (Z) und Kurzezeitfestigkeit (K) [9]

1.2.1.1 High Cycle Fatigue (HCF)

Charakteristisch dafür ist eine kraftgesteuerte, zyklische Belastung. Gekennzeichnet ist die Ermüdung von Stahl bei hoher Lastspielzahl durch die Wöhlerkurve mit einer Ermüdungsgrenzbelastung von 1×10^7 Zyklen. Wichtige Einflussfaktoren für die Lebensdauer sind:

- Material
- Geometrie
- Temperatur
- Größe und Richtung der zyklischen Belastung
- Eigenspannung
- Herstellungsverfahren
- Umweltbedingungen

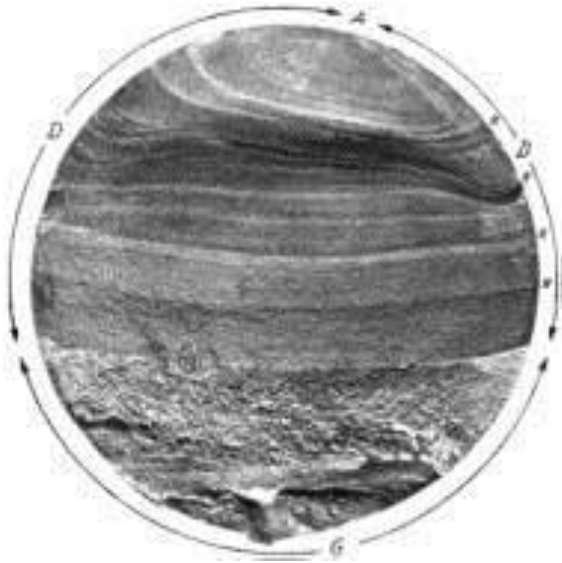


Abbildung 1-2: Typische Ausbildung einer Schwingbruchfläche; Anriss (A), Dauerbruch (D), Gewaltbruch (G) [9]

Abbildung 1-2 zeigt die typische Ausbildung einer Schwingbruchfläche. Dabei kommt es zuerst zu einem Anriss (A). Dieser bildet den Startpunkt des Bruches. Als erster Bereich ist eine typische Dauerbruchfläche (D) mit dazwischen liegenden hell erscheinenden Rastlinien zu erkennen. Wenn die Belastung für das Bauteil zu groß wird, bricht es schlussendlich und es ist die deutlich erkennbare Gewaltbruchfläche (G) zu sehen.

1.2.1.2 Low Cycle Fatigue (LCF)

Die Abgrenzung zum LCF Bruch erfolgt bei 10^4 Lastwechseln. Das makroskopische Erscheinungsbild ist quasi identisch. Unter Umständen können an der Risspitze Schwingungstreifen beobachtet werden [10].

1.2.2 Thermo mechanical fatigue (TMF)

Herkömmliche Materialermüdung ist die zyklische, mechanische Belastung des Materials bei isothermen Verhältnissen (konstanter Temperatur), die schließlich zum Verlust von Festigkeit und zum katastrophalen Materialversagen durch Bruch führen kann. Thermische Ermüdung ist die zyklische Belastung des Materials durch Temperaturänderungen ohne Krafteinwirkung. Das Materialversagen tritt hierbei durch das Auftreten von Thermo- und Spannungsgredienten ein.

Werden nun zyklische thermische und zyklische mechanische Belastung gekoppelt, so spricht man von thermo-mechanischer Ermüdung, die eine große Bedeutung bei Konstruktion und Auslegung von thermisch und mechanisch belasteten Bauteilen hat [10].

Für thermo-mechanische Ermüdung wird, wie auch im deutschen Sprachgebrauch, häufig die Abkürzung des englischen Begriffs **Thermo-Mechanical Fatigue** (TMF) verwendet. Eher selten findet man in der Literatur die deutsche Abkürzung TME.

1.2.3 Verschleiß

Verschleiß bezeichnet den Materialabtrag der Oberfläche eines festen Körpers, der durch mechanische Ursachen hervorgerufen wird. Dies bedeutet, dass die Kontakt- und Relativbewegung eines festen Gegenkörpers einen Materialverlust durch Schleifen, Rollen, Schlagen oder Kratzen hervorruft, siehe Abbildung 1-3. Außerdem wird Verschleiß auch mit anderen Arten der Abnutzung gleichgesetzt.

Verschleiß ist einer der Hauptgründe für Bauteilschädigung und den damit verbundenen Ausfällen von Maschinen und Geräten. Die Verringerung von Verschleiß ist darum eine wesentliche Möglichkeit, die Lebensdauer von Maschinen und Geräten zu erhöhen und damit Kosten und Rohstoffe einzusparen. Andererseits wird versucht, den nicht zu vermeidenden Verschleiß auf einfach auszutauschende Bauteile einzugrenzen, die man unter dem Begriff Verschleißteile zusammenfasst [10].

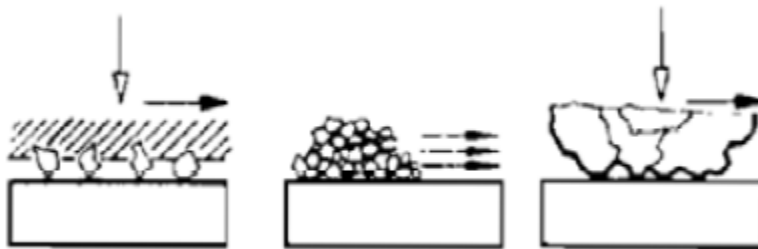


Abbildung 1-3: mögliche Verschleißursachen [10]

1.2.4 Alterung

Unter Alterung versteht man im Allgemeinen eine zeitliche, häufig unerwünschte Veränderung der Materialeigenschaften (Härtesteigerung, Versprödung, Erweichung usw.). Auf metallische Werkstoffe bezogen bedeutet Alterung eine temperatur- und zeitabhängige Eigenschaftsänderung zum Beispiel nach Verformung und Wärmebehandlung.

Im Falle von Stahl führt sie zu deutlich verschlechterter Plastizität bzw. Verarbeitbarkeit. So können bei bestimmten Stählen die Streckgrenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und -einschnürung, Härte, Kerbschlagzähigkeit aber auch elektrische und magnetische Kenngrößen durch Alterung verändert werden.

Man unterscheidet zwischen natürlichem Altern, das bei Raumtemperatur ohne Einwirkung anderer Einflüsse stattfindet, und dem künstlichen Altern bei höheren

oder tieferen Temperaturen. Beides wird den thermischen Verfahren zugeordnet. Ein durch Glühen, Abschrecken und Auslagern hervorgerufener Alterungsprozess wird als Abschreckalterung bezeichnet. Findet die Alterung infolge von Verformung und Auslagerung statt, so spricht man von Verformungs- oder Reckalterung [10].

1.2.5 Vergiftung

Vergiftungen treten hauptsächlich in der Abgasnachbehandlung und da wiederum im SCR-Katalysator auf. Ausschlaggebend dafür sind Verunreinigungen in Betriebsstoffen (Kraftstoff, Motoröl und AdBlue[®]) wie zum Beispiel Blei, Schwefel, Zink oder Kalium, siehe Abbildung 1-4. Diese sind zu minimieren bzw. zu vermeiden, da ihre Zersetzungsprodukte desaktivierend wirken [11].

Kalium kommt hauptsächlich in Biodieselskraftstoffen der ersten Generation vor. Nach der europäischen Norm EN1414 dürfen im Biodieselskraftstoff maximal 5 ppm Kalium enthalten sein.

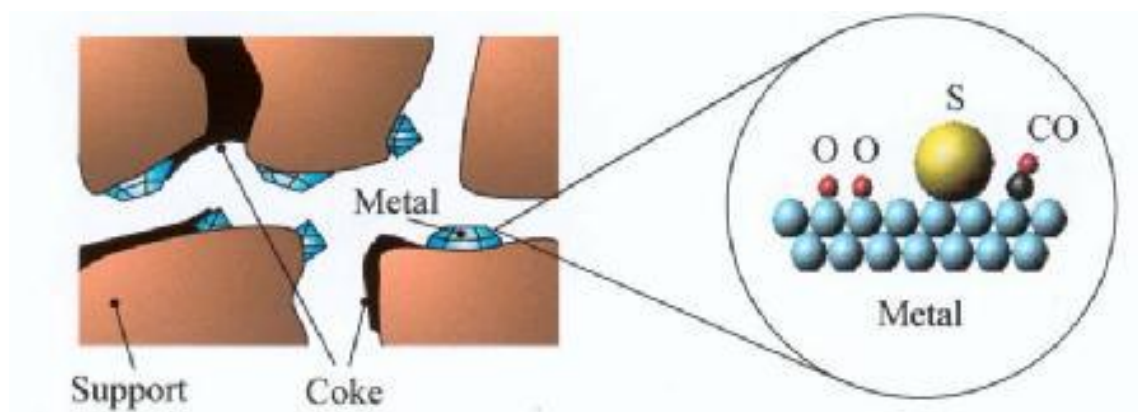


Abbildung 1-4: Schema - Chemische Vergiftung im SCR- Katalysator [11]

1.2.6 Ablagerungen

Ablagerungen können unter anderem im Bereich der Kühlmittelversorgung, des Brennraumes sowie im Bereich des Abgasstranges entstehen.

Speziell bei neuen Motoren mit modernster Abgasnachbehandlung (Euro 6) mit AdBlue[®] Dosierung können bei bestimmten Umgebungsbedingungen, schlecht gewählter Position der Einspritzdüse, sowie falschem Spraybild Ablagerungen entstehen. Die Folge ist ein erhöhter Kraftstoffverbrauch.

1.2.7 Kavitation

Das Wort „Kavitation“ bedeutet Hohlrumbildung. Um einen Hohlraum in einer Flüssigkeit zu erzeugen, muss die Flüssigkeit zunächst gedehnt und dann zerrissen werden.

Unter Kavitation versteht man die Bildung und Implosion von Hohlräumen in Flüssigkeiten. Kavitation tritt auf, wenn zum Beispiel aufgrund hoher Strömungsgeschwindigkeiten der hydrostatische Druck lokal auf einen kritischen Wert absinkt, der in etwa dem Dampfdruck der Flüssigkeit entspricht. Es bilden sich dann kleine mit Wasserdampf und Gasen gefüllte Blasen, die mit der strömenden Flüssigkeit schließlich in Bereiche höheren Druckes gelangen und dort zusammenstürzen. In der Endphase der Blasenimplosion entstehen im Inneren der Blase und in ihrer näheren Umgebung hohe Druckspitzen, die zu mechanischen Schwingungen, Geräuschen und im Bereich fester Wände zu einer Erosion der Materialoberflächen führen. Bei ausgeprägter Kavitation ändern sich die hydraulischen Eigenschaften des Fluids [12].

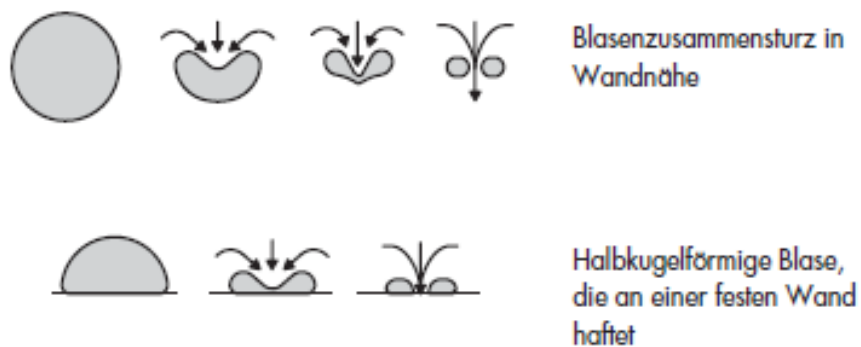


Abbildung 1-5: Schematische Darstellung der Blasenimplosion [13]

1.3 Schädigungsrechnung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Thematik der Schädigungsrechnung. Da dies ein großes wie auch komplexes Aufgabengebiet ist, befasst sich die vorliegende Arbeit nur mit einem kleinen Teil davon, welcher im Kapitel 1.3.1 näher beschrieben wird.

In der Schädigungsrechnung vereinfacht man physikalische Vorgänge, um mithilfe weiterer Annahmen diese Vorgänge durch mathematische Modelle korrekt zu beschreiben. Das Ziel der Simulation ist die Beschreibung realitätsnaher Zusammenhänge, die als Output das Verhalten des jeweiligen Bauteils liefert [4].

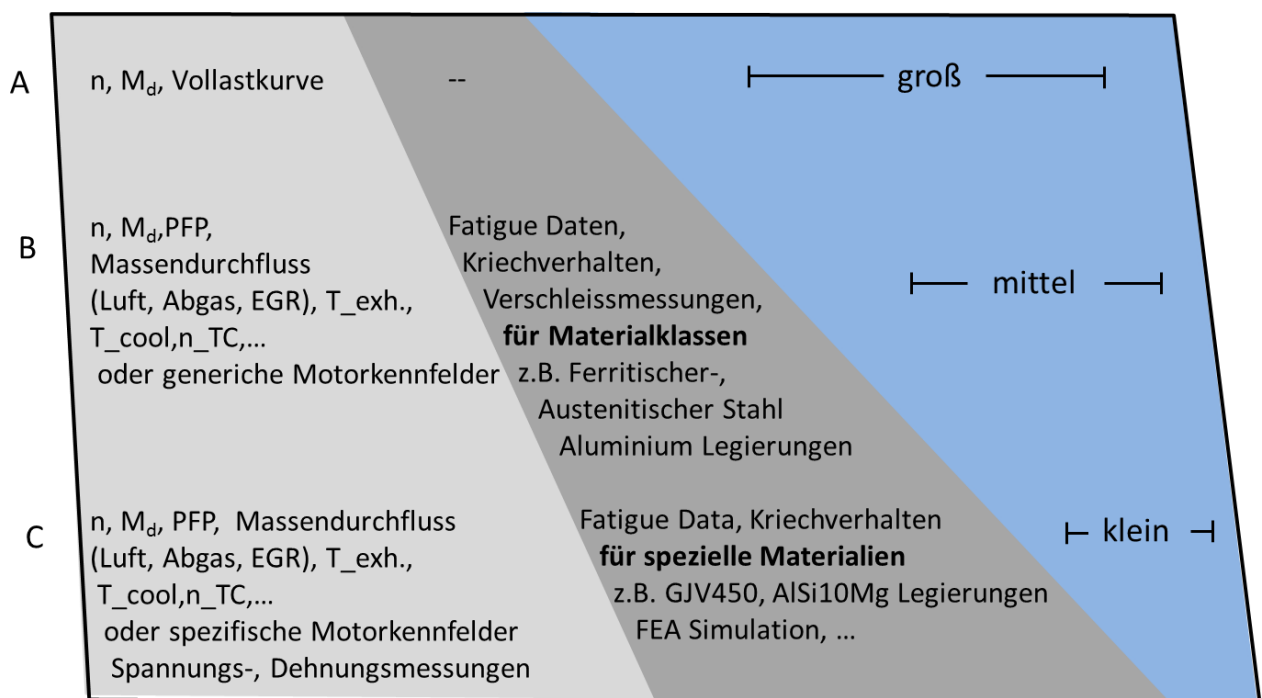


Abbildung 1-6: Arten der Schädigungsmodelle und deren Inputgrößen inkl. Streuband [5]

Wie in Abbildung 1-6 gezeigt gibt es verschiedene Arten von Schädigungsmodellen. Je größer die Komplexität dieser Modelltypen (von A bis C) ist (in grau gekennzeichnet), desto kleiner ist das Streuband der Ergebnisse (dargestellt in blau).

Die **A-Modelle** sind lastbasiert und stellen die einfachste Variante dar. Als Inputgrößen genügen bereits Drehmoment, Drehzahl sowie die Volllastkurve des zu behandelnden Motors.

Bei **B-Modellen** wird zusätzlich zur Belastung noch die Belastbarkeit berücksichtigt. Als Belastbarkeitsgrößen werden generische Größen oder typische Werkstoffkennwerte verwendet. Auf die Ermittlung bauteilspezifischer Belastbarkeiten wird hier allerdings verzichtet. Der Input im Vergleich zum A-Modell erweitert sich um Größen wie zum Beispiel Massendurchfluss von Luft, AGR oder Ähnlichem, sowie Temperaturen von Abgas oder Kühlmittel.

C-Modelle stellen den komplexesten Modelltyp dar, der zur Anwendung kommt. Die Belastung wird beispielsweise anhand von Dehnungsmessungen oder Temperaturmessungen an der Komponente direkt erfasst oder mittels Finite Elemente Methoden bestimmt. Zur Bestimmung der Belastbarkeit führt man Ermüdungs- oder Alterungsversuche an der Komponente durch.

Alle drei Modelltypen liefern einen relativen Schädigungswert. Auf Basis dieser Werte wird die schädigende Wirkung der Tests quantifiziert, was auf diese Weise Vergleiche zwischen Tests oder einem Referenzzyklus erlaubt.

Stellvertretend für ein A-Modell wird dieser Vorgang an einem konkreten Beispiel im folgenden Kapitel (Kapitel 1.3.1) näher erklärt.

1.3.1 Pleuellagerverschleiß als Beispiel

Das Pleuel verbindet den Kolben mit der Kurbelwelle. Die translatorische Bewegung des Kolbens wird dadurch in eine rotierende Bewegung auf der Kurbelwelle umgewandelt. Dabei wird Öl durch Bohrungen in der Kurbelwelle bis zum Kurbelzapfen gefördert und somit die Schmierung im unteren Pleuellager gewährleistet. Durch eine weitere Bohrung durch den Pleuelschaft gelangt das Öl auch zum oberen Pleuellager. Die Lagerung des Pleuels basiert meistens auf dem Prinzip der Gleitlager [15].

Demnach kann das physikalische Modell basierend auf der hydrodynamischen Schmierfilmbildung abgeleitet werden, welches physikalisch der Stribeck-Kurve, siehe Abbildung 1-7, entspricht. Diese zeigt den Zusammenhang zwischen Reibwert und Drehzahl in einem Gleitlager.

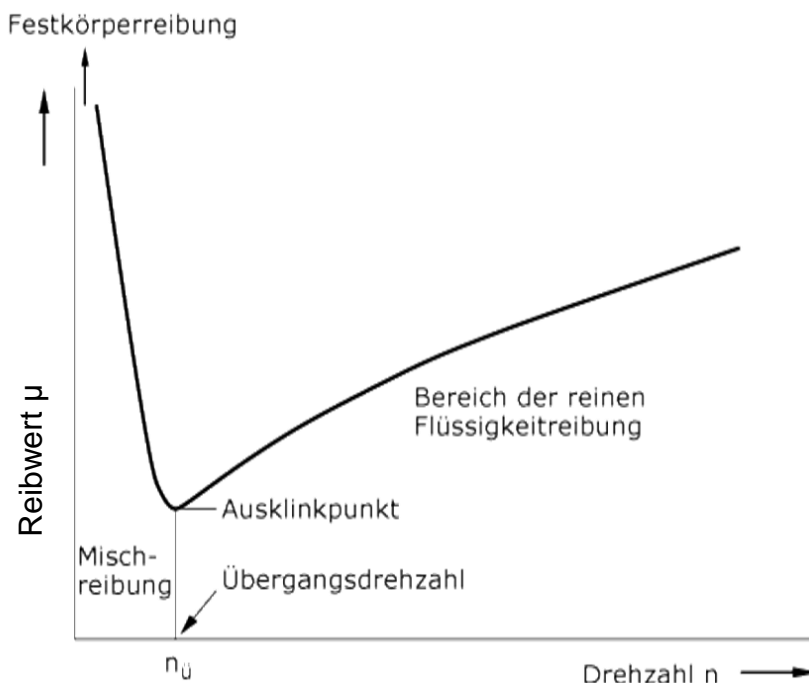


Abbildung 1-7: Stribeck-Kurve [8]

Der Reibwertverlauf ist dabei abhängig von der Drehzahl sowie weiteren Parametern wie Flächenpressung, Material, Geometrie oder Temperatur.

Im unteren Teil ($n < n_{\ddot{u}}$), dem Bereich der Mischreibung, berühren sich die beiden Reibpartner punktuell. Dabei steigt der Reibwert mit sinkender Drehzahl stark an. Mischreibung kann bei unzureichender Schmierung, hoher Last (hohe Spitzendrücke) oder bei geringer Drehzahl auftreten.

Ab dem Ausklinkpunkt ($n > n_{\ddot{u}}$) beginnt die Flüssigkeitsreibung. Dabei trennt der aufgebaute Schmierfilm die Reibflächen. Wird die Drehzahl weiter gesteigert, erhöht sich in weiterer Folge der Reibwert.

Aus Versuchen geht hervor, dass im Speziellen bei Dieselmotoren aufgrund der geringen Drehzahlen in Verbindung mit hohen Lasten (hoher Spitzendruck) das Phänomen der Mischreibung, siehe Abbildung 1-7, häufig auftritt.

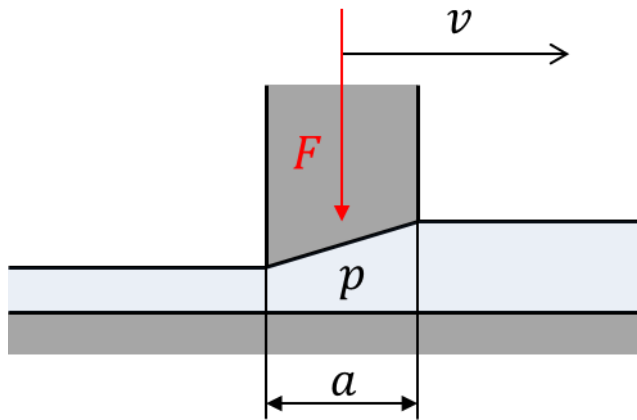


Abbildung 1-8: Prinzip der hydrodynamischen Lagerung

Abbildung 1-8 zeigt das Prinzip der hydrodynamischen Lagerung. Mit steigendem Spitzendruck erhöht sich aus $p=F/a$ auch die Kraft F . Dies hat zur Folge, dass die beiden Reibpartner sich berühren.

Aus der Formel $\frac{F_i}{a} \leq p_i \sim v_i \sim n_i$ erkennt man, dass der Druck p proportional zur Geschwindigkeit v ist, die wiederum proportional zur Drehzahl n ist. Wird nun ein Zyklus mit den Inputgrößen M_D , n und der dazugehörigen Volllastkurve betrachtet, gilt folgende Beziehung:

$$F_i \sim M_D$$

$$p_i \sim n$$

Gleichung 1: Proportionalitätszusammenhänge in der Schädigungsrechnung

Somit kann ein Schaden D aus der Beziehung $D = M_D^\alpha * \frac{1}{n^\beta}$ berechnet und mit anderen Zyklen verglichen werden.

Die Exponenten α und β dienen dabei als Modellkalibrierungsparameter und wurden experimentell ermittelt, vergleiche [7].

1.4 Qualitäts- und Zuverlässigkeitsziele

Die Zuverlässigkeitstechnik (Reliability Engineering) befasst sich unter anderem mit der Auslegung und Optimierung der Zuverlässigkeit von Produkten, sowie dem Abschätzen von beispielsweise Garantie- oder Wartungskosten. Dabei werden eine Reihe von mathematischen Modellen sowie simulatorischen Werkzeugen verwendet, auf die in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht weiter eingegangen wird. [14]

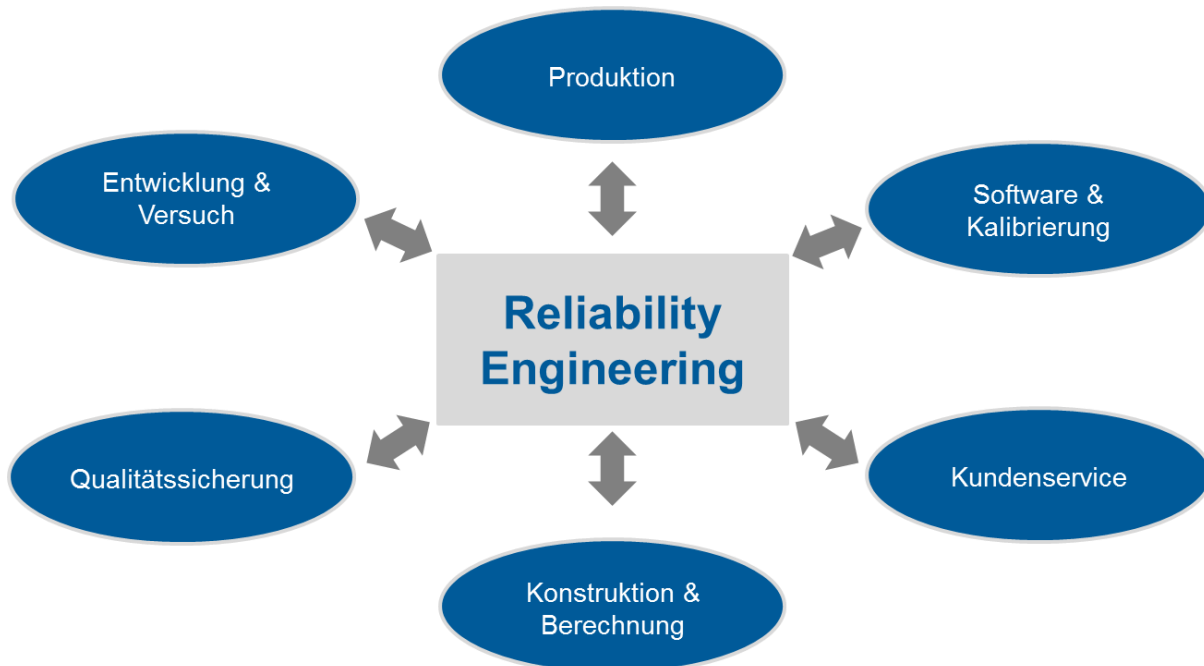


Abbildung 1-9: Reliability Engineering als Querschnittsfunktion[14]

1.4.1 Zuverlässigkeit

Zuverlässigkeit definiert im Allgemeinen die Eigenschaft eines Systems, die Funktionsfähigkeit bezüglich der Nutzungsbedingungen innerhalb einer geforderten Nutzungsdauer ohne Fehler zu erfüllen. Aus diesem Grund wird die Zuverlässigkeit als Qualität über die Zeit bezeichnet. Für die Berechnung der Zuverlässigkeit werden in der Regel alle Defekte berücksichtigt.

1.4.2 Dauerhaltbarkeit

Unter der Dauerhaltbarkeit versteht man die Zeit, in welcher ein Bauteil seine Funktion erfüllt. Dauerhaltbarkeit beschreibt die Lebensdauer eines Bauteils. Dies bedeutet, dass nicht alle Ausfälle dauerhaltbarkeitsrelevant (und damit die Lebensdauer beendend) sind. Die Zeit wird dabei in der Regel in Stunden, Lastwechseln, Überrollungen oder mit Hilfe der Laufleistung angegeben

Die Dauerhaltbarkeit wird oft mit Hilfe des B_{10} -Wertes gemessen, siehe Abbildung 1-10. Der B_{10} -Wert ist jene Zeit, bei der unter gegebenen Bedingungen 10% aller Bauteile ausgefallen sind, oder anders formuliert eine Zuverlässigkeit von 90% besteht [14].

Um die Dauerhaltbarkeit zu bestimmen, muss das Ausfallkriterium klar definiert sein.

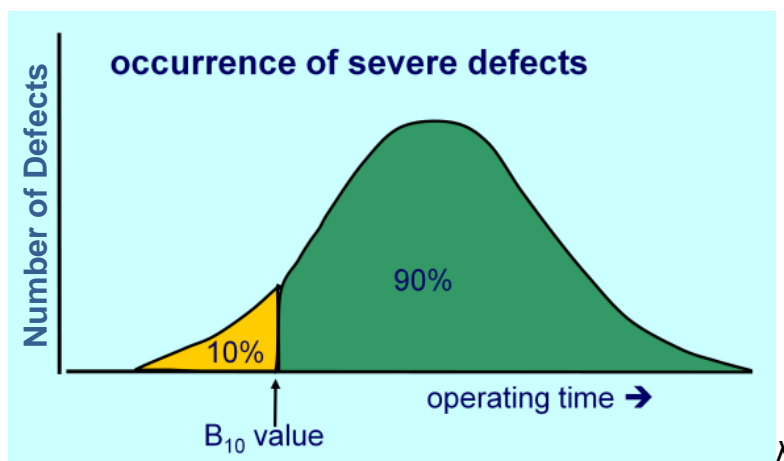


Abbildung 1-10: Schematische Darstellung des B_{10} - Wertes als Lebensdauermaß [14]

1.4.3 Zuverlässigkeit vs. Dauerhaltbarkeit

Der Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Dauerhaltbarkeit kann am besten an einem kleinen Gedankenexperiment veranschaulicht werden:

Von einem PKW erwartet man ohne Tausch der wichtigsten Teilsysteme, wie zum Beispiel Motor, Getriebe oder Karosserie, dass eine ausreichende Lebensdauer (ca. 250.000 km) erreicht wird (*Dauerhaltbarkeit*). Ebenso wird verlangt, dass das Fahrzeug während einer bestimmten Zeit (zum Beispiel 100.000 km) nach Möglichkeit keine Defekte wie zum Beispiel Motorschaden, aber auch keine kleineren Defekte wie zum Beispiel Sensordefekte oder Geräusche aufweist (*Zuverlässigkeit*) [14].

1.4.4 Ausfallsverteilung

Die in Abbildung 1-11 dargestellte Ausfallsverteilung beschreibt – in idealisierter Form – die typische Entwicklung der Ausfallsrate eines mechanischen Systems während der Nutzungszeit, die aufgrund der Kurvenform auch als „Badewannenkurve“ bezeichnet wird. Dabei können drei Bereiche unterschieden werden: der Bereich der Frühausfälle (Bereich I), der Bereich der Zufallsausfälle (Bereich II) und der Bereich der Verschleiß- und Ermüdungsausfälle (Bereich III).

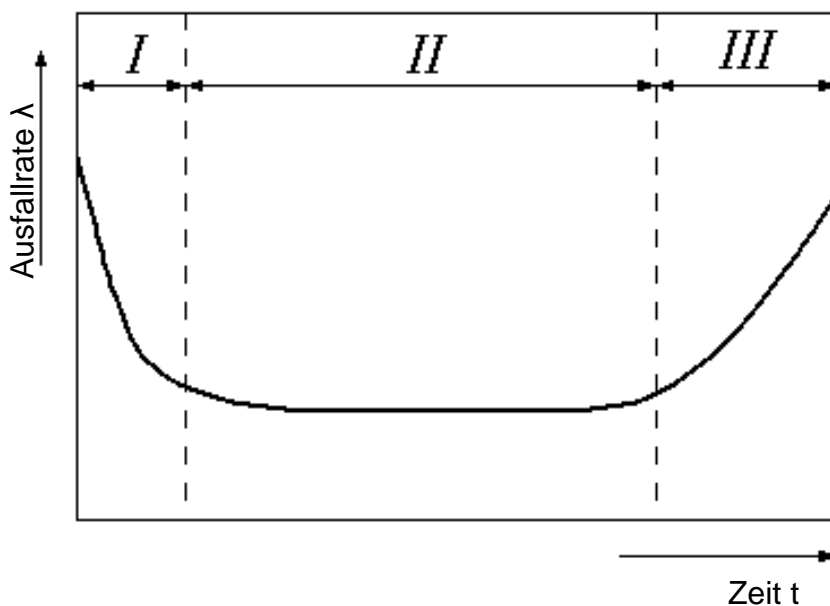


Abbildung 1-11: Badewannenkurve [14]

Der erste Bereich (Frühausfälle) weist eine abfallende Ausfallsrate auf. Somit reduziert sich mit steigender Lebensdauer das Risiko, dass ein Bauteil ausfällt. Diese Ausfälle werden zum Beispiel durch Konstruktionsfehler, Montage- oder Werkstofffehler verursacht.

Der zweite Bereich (Zufallsausfälle) zeigt eine nahezu konstante Ausfallsrate über die Lebensdauer. Diese Zufallsausfälle werden beispielsweise durch Schmutzpartikel, Wartungs- oder Bedienfehler verursacht und können im Voraus nur schwer abgeschätzt werden.

Im dritten Bereich der Badewannenkurve (Verschleiß- und Ermüdungsausfälle) steigt die Ausfallsrate über die Lebensdauer wieder an. Das bedeutet wiederum, dass im Laufe der Zeit das Risiko der ausfallenden Teile wieder zunimmt.

Den verschiedenen Bereichen der Badewannenkurve liegen verschiedene Ausfallursachen zugrunde. Darum werden für die verschiedenen Bereiche auch unterschiedliche Maßnahmen eingesetzt, um die Zuverlässigkeit zu erhöhen. So werden beispielsweise für den Bereich der Frühausfälle umfangreiche Maßnahmen, wie eine umfangreiche Nullserie oder Fertigungs- und Qualitätskontrollen eingesetzt. Im zweiten Bereich, dem der Zufallsausfälle, ist auf eine korrekte Bedienung und Wartung zu achten. Auch die Vermeidung des Missbrauchs ist in diesem Bereich zu berücksichtigen. Die Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit in den ersten beiden Bereichen sind somit durch entsprechende Schritte im Entwicklungs- und Gebrauchsverlauf sicherzustellen.

Für den dritten Bereich sind praxisnahe Versuche, sowie eine genaue Berechnung erforderlich. Eine Erhöhung der Zuverlässigkeit in diesem Bereich kann alleine durch die optimale konstruktive Auslegung erfolgen.

1.5 Was ist überhaupt im Zuge der Erprobung validierbar?

Im Zuge der Erprobung können ausschließlich Verschleiß- und Ermüdungsausfälle (siehe Abbildung 1-11, Bereich III) validiert werden. Zusätzlich dazu sind weitere Themen zu beachten:

- Erprobungsprämissen
- Verschärfende Nebenbedingungen
- Dauerfestigkeit

1.5.1 Erprobungsprämissen

Um überhaupt eine Komponente absichern zu können, gibt es einige Prämissen zu berücksichtigen.

Serienäquivalente Bauteilqualität bedeutet, dass die Bauteilqualität des Prototyps der Bauteilqualität der Serie entspricht. Wesentlich dabei ist, dass diese in der Prototypenphase nicht höher ist als in der Serie.

Ähnliches gilt auch für das Thema Motorkalibrierung. Wesentlich dabei ist, dass die Belastungen während der Erprobung nicht niedriger sind als in der Serie.

Des Weiteren sollten seriennahe Versuchsträger (meist Fahrzeuge) zum Einsatz kommen.

1.5.2 Verschärfende Nebenbedingungen

Verschärfende Nebenbedingungen haben eine direkte Auswirkung auf die Belastung des Bauteiles an sich. Wesentliche Einschränkung dabei ist, dass diese typischerweise nur bei einer geringen Anzahl von Endkunden in Erscheinung treten.

Ist ein Subsystem hinsichtlich Summentoleranzen empfindlich, so ist es nicht absicherbar – es muss umkonstruiert werden.

Ein weiterer Aspekt sind Umwelteinflüsse wie zum Beispiel Seehöhe, Temperatureinflüsse oder Einflüsse durch chemische oder elektrische Korrosion, wie beispielsweise durch Salze oder Reinigungsmedien.

Aber auch die Qualität der Betriebsstoffe, wie Öl- oder Kraftstoffqualität, haben einen entscheidenden Einfluss auf die Belastung des Bauteils an sich.

1.5.3 Dauerfestigkeit

Die Dauerfestigkeit erfordert eine gezielte sowie eine ausreichend lange Lastüberhöhung zur Ermittlung des Ausfallsverhaltens.

Da die Lastüberhöhungen im Dauerlauf nicht in gezielter Weise dargestellt werden können, sind diese Bauteilschadartkombinationen im Dauerlauf nicht absicherbar.

1.6 Referenzzyklen

Grundsätzlich gibt es mehrere Arten von Referenzzyklen (siehe Abbildung 1-12). Zum einen sind dies synthetische Referenzzyklen wie beispielsweise der NEDC- oder der WHTC-Zyklus. Dabei können Fahrzeuge hinsichtlich Verbrauch, Abgasemissionen oder Ähnlichem untereinander verglichen werden.

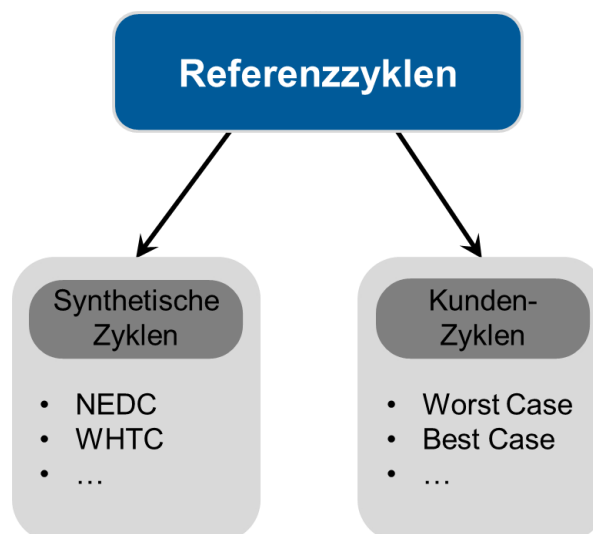


Abbildung 1-12: Arten von Referenzzyklen

Zum anderen gibt es die kundennahen Referenzzyklen, mit denen man das reale Kundenverhalten abzubilden versucht. Die Qualität eines solchen Zyklus hat einen erheblichen Einfluss auf die Schädigungsrechnung (siehe Kapitel 1.3). Aufgrund der Komplexität der Off-Road Anwendungen ist es häufig nicht möglich, in lediglich einem Referenzzyklus das gesamte mögliche Verhalten abzubilden.

In Abbildung 1-13 ist schematisch das Kundenverhalten über die durchschnittliche Leistung eines Arbeitsgerätes dargestellt. Demnach stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien der Referenzzyklus ausgewählt werden soll. Der „50%-Kunde“ steht für einen typischen Kunden (typische durchschnittliche Leistung), während der „99%-Kunde“ ein Extremum im Sinne der durchschnittlichen Leistung darstellt. Die Entscheidung, ob der Fokus auf einem typischen oder extremen Kunden liegt, wird in der Praxis sehr oft vom OEM getroffen, da dies für die Bestimmung des Aufwands für die Validierung entscheidend ist. Des Weiteren sollte auch das Thema „Missbrauch“ klar abgegrenzt bzw. definiert werden.

Die Verwendung der durchschnittlichen Leistung ist hier als exemplarisch zu verstehen. Sehr wohl können statt der Leistung auch andere Parameter, insbesondere zur Beschreibung der Belastung, zur Anwendung kommen.

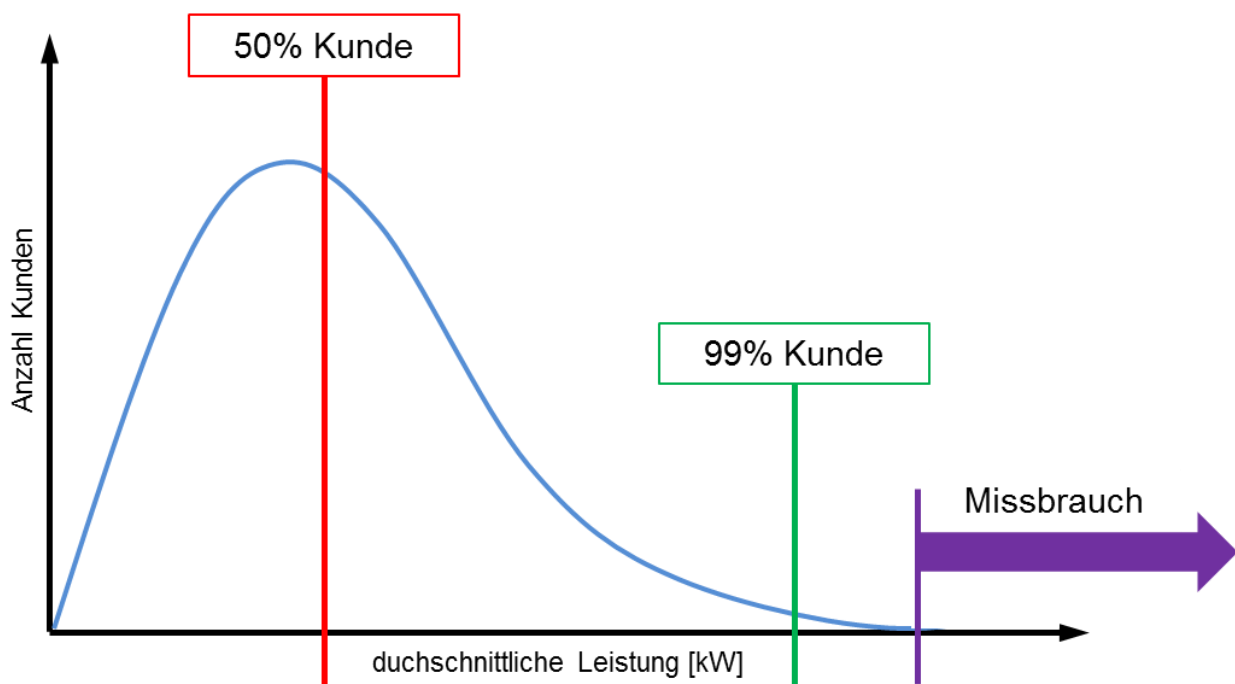


Abbildung 1-13: Schematische Abbildung des Kundenverhaltens

1.7 Arten der Referenzzyklenbestimmung

Grundsätzlich lässt sich die Zielsetzung bei der Bestimmung von Referenzzyklen anhand des V-Modells eines Entwicklungsprozesses (Abbildung 1-14) darstellen.

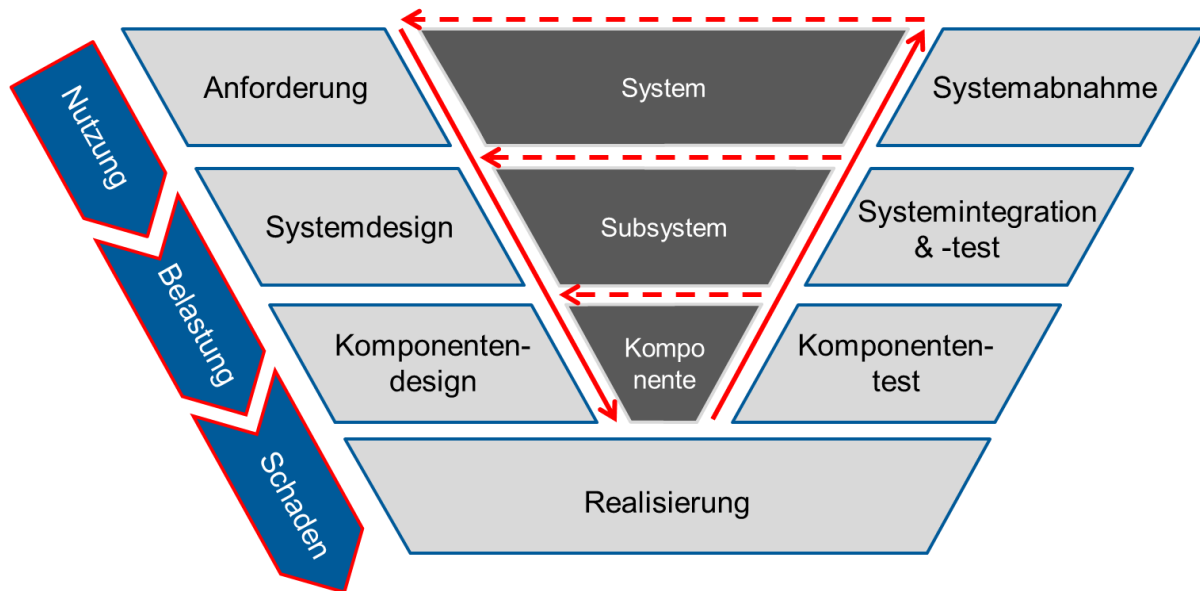


Abbildung 1-14: Schema des V-Modells eines Entwicklungsprozesses

Arten der Referenzzyklenbestimmung:

- Nutzungsgetriebene Betrachtung
- Belastungsgetriebene Betrachtung
- Schädigungsgetriebene Bertachtung

Die verwendeten Parameter, welche Nutzung, Belastung oder Schädigung beschreiben, bestimmen somit den Fokus der Referenzwahl. In gewissen Anwendungsfällen ist es auch von Vorteil, Parameter aus mehreren der oben genannten Gruppen zu wählen.

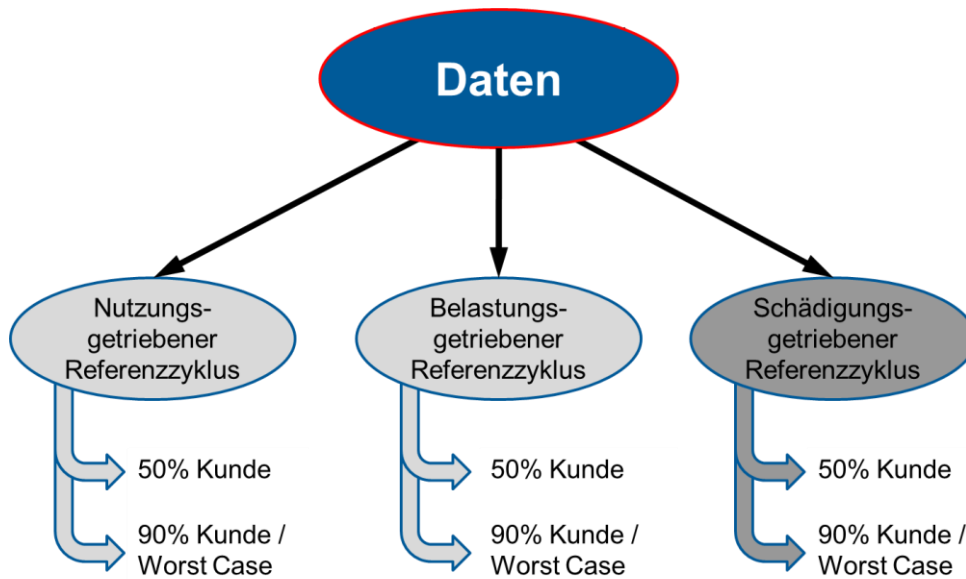


Abbildung 1-15: Arten der Referenzzyklenbestimmung

Alle oben genannten Arten der Referenzzyklenbestimmung, sei es nutzungsgetrieben, belastungsgetrieben oder schädigungsgetrieben, kommen typischerweise zum Einsatz. Je nach Verwendung der bestimmten Referenzzyklen ist eine entsprechende Wahl der passenden Methode zur Referenzzyklenbestimmung zu wählen. Die Entscheidung liegt in der Regel beim Hersteller, in welche Richtung er seine Referenz legen möchte und wie schlussendlich sein Produkt (zum Beispiel das Fahrzeug) abgesichert werden sollte.

Je nach prozentualer Aufteilung der Anwendungen werden Teilabschnitte aus den realen Messfahrten zu einem gesamten Zyklus vereint, der das Verhalten des jeweiligen Kunden abbildet.

Die in Abbildung 1-16 bezeichneten Teilabschnitte 1 bis 7 sind dabei aus realen Messfahrten entnommen und aneinander gereiht. Je nach Auswahl solcher Teilabschnitte lassen sich solche Referenzzyklen höher- oder niedriglastiger gestalten.

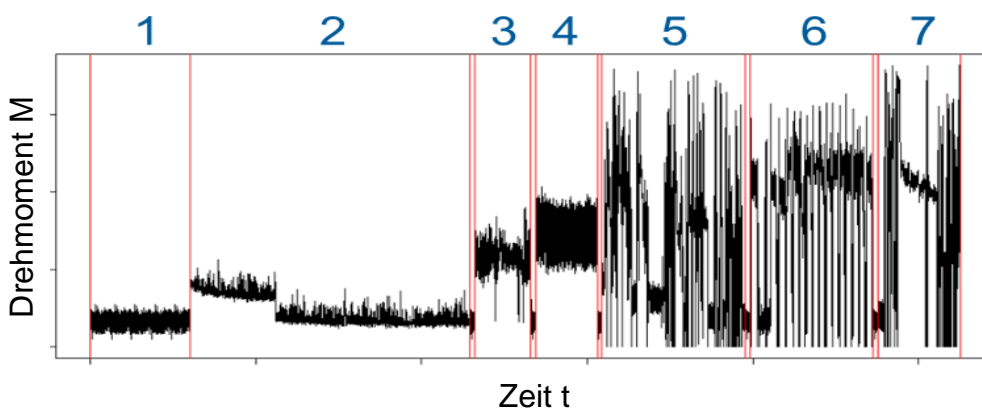


Abbildung 1-16: Schematischer Referenzzyklus

1.7.1 Nutzungsgetriebene Betrachtung

Die nutzungsgetriebene Betrachtung befasst sich intensiv mit der Analyse von Endkunden hinsichtlich Einsatzverhalten und Nutzungsart. Da meist eine Menge von Daten zur Bewertung zu Verfügung steht, bedient man sich der Statistik, welche in der Fahrzeugentwicklung eine immer größere Rolle spielt.

Idealerweise sind bei dieser Betrachtung Messdaten von diversen Fahrzeugvarianten sowie von sämtlichen Applikationen (siehe Kapitel 1.9.1) in ausreichender Menge vorhanden. Dadurch kann sehr gut abgeschätzt werden, wie sich die Endkunden im realen Einsatz verhalten werden.

Entgegen dem oben genannten Fall mit vielen verfügbaren Daten ist es in der Praxis ebenso möglich, dass Fahrzeugmessdaten nur sehr dürrtig bzw. in unzureichender Qualität bezüglich Auflösung und / oder Dokumentation vorhanden sind. Durch fehlende Information zu Neben- oder Einsatzbedingungen werden Interpretationen der Messdaten deutlich erschwert.

Inputs der nutzungsgetriebenen Betrachtung:

- Beschreibung des typischen Nutzers (Applikationen, Zielländer, etc.)
- Einsatzzeit pro Tag (min. / max. / Durchschnitt)
- Einsatzzeit pro Jahr
- Zeitbasierte Messdaten (zumindest Drehzahl und Drehmoment in 1Hz Auflösung)

Der Output sind Referenzzyklen, die darstellen, wie beispielsweise der 50%- oder 90%- Kunde sein Fahrzeug bewegt.

1.7.2 Schädigungsgetriebe Betrachtung

Die schädigungsgetriebene Betrachtung geht in Richtung Komponentenschädigung. Dabei werden, wie in Kapitel 1.3 beschrieben, je nach Schadensart unterschiedliche physikalische Modelle zur Simulation der Schädigung herangezogen.

Dafür sind, wie auch bei der nutzungsgetriebenen Betrachtung, zeitaufgelöste Daten erforderlich. Als Output liefert die Simulation Schädigungswerte, die mit Hilfe von Analysemethoden, wie zum Beispiel Normierung, Ranking und Korrelationsbewertung (wie an einem praktischen Beispiel gezeigt in Kapitel 2.9ff.), untereinander verglichen werden können.

Der Output sind wie schon erwähnt Referenzzyklen im Sinne der Schädigung. Diese bedienen sich zwar an den gleichen Inputgrößen hinsichtlich Messfahrten wie die nutzungsgetriebenen Referenzzyklen; Unterschiede sind beispielsweise die dabei verwendeten Kanäle die je nach Schädigungsmodell zum Einsatz kommen. Diese sind wie schon in Kapitel 1.3 erwähnt Drehzahl, Drehmoment, Abgastemperaturen oder PFP.

Inputs der schädigungsgetriebenen Betrachtung:

- Zeitbasierte Messdaten, wie Drehzahl und Drehmoment des Motors
- Vollastkurve des Motors
- Kennfelder, wie zum Beispiel maximaler Zünddruck (PFP)
- Eventuelle Temperaturmessschriebe

1.8 AVL Load Matrix™

Die steigende Komplexität der Antriebssysteme bei gleichzeitiger Senkung der Entwicklungszeit erschwert die Sicherstellung der Produktqualität zum Zeitpunkt des Produktstarts erheblich. Ohne geeignete Gegenmaßnahmen treten verstärkt Mängel beim Endkunden auf. Um die Kundenzufriedenheit dennoch zu gewährleisten, entstehen dem Fahrzeughersteller zusätzlich Kostenrisiken hinsichtlich verlängerter Garantie- bzw. Kulanzzeiten.

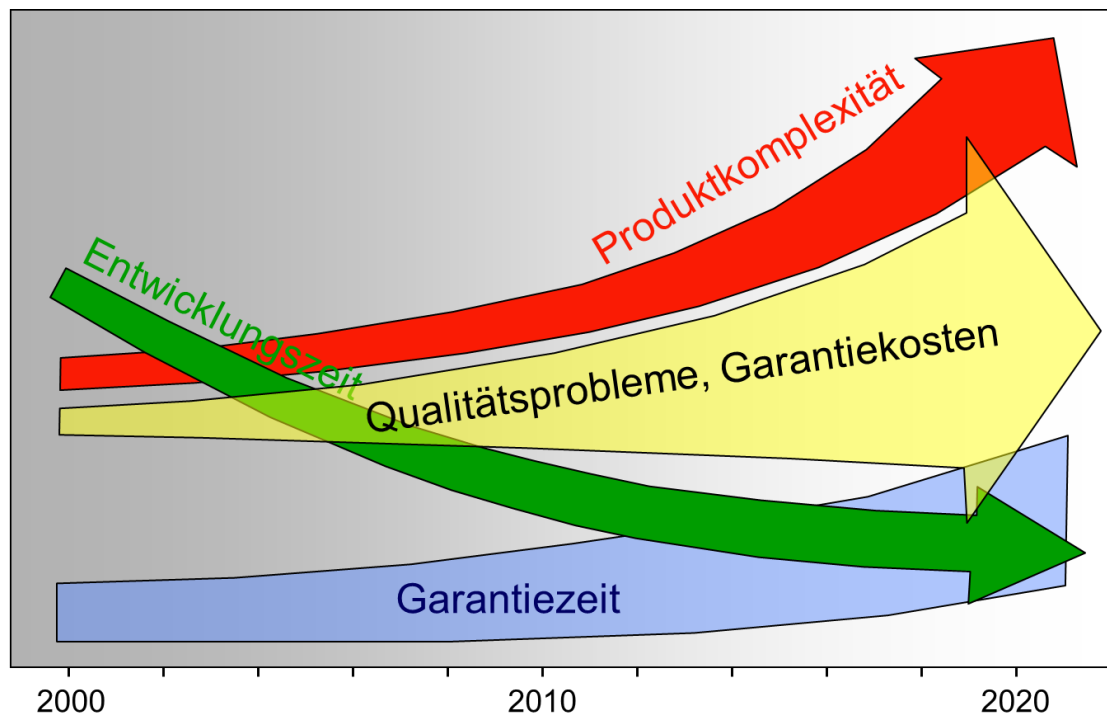


Abbildung 1-17: Aktuelle Trends in der Produktentwicklung - erhöhtes Risiko? [4]

Aus diesem Grund wurde die AVL Load Matrix™ für Motoren und Antriebssysteme entwickelt. Ziel dieser Methodik ist die systematische Optimierung von Validierungsprogrammen auf Ebene der Bauteilschadartkombinationen.

Die AVL Load Matrix™ ist in vier Hauptschritte unterteilt:

- (1) System Analyse
- (2) Applikationen und Zielwerte
- (3) Testprogramm und Belastungsanalyse
- (4) Auswertung und Optimierung



Abbildung 1-18: AVL Load-Matrix™ Übersicht [5]

1.8.1 System Analyse

Die System Analyse ist der erste Schritt im AVL Load Matrix™ Prozess. Das Ziel der System Analyse ist die Zusammenstellung der potentiellen Fehler und Priorisierung der validierungsrelevanten Bauteilschadartkombinationen für die weitere Analyse des Validierungsprogramms. Sie gibt eine Übersicht über System, Subsystem und Komponenten und die validierungsrelevanten Schadensarten. Ebenso enthält sie die Definition der schädigenden Betriebsbedingungen (zum Beispiel Vollastbetrieb, siehe FP- File, siehe Tabelle 2-4) welche durch das Validierungsprogramm abgedeckt werden müssen.

Die folgenden Schritte werden im Rahmen der System Analyse durchgeführt:

- Definition des Systemumfangs
- Systempriorisierung (Definition des Arbeitsumfangs)
- Ausfallsart-Parameter-Analyse (Definition der Bauteilschadartkombinationen, Analyse der schädigenden Betriebsbedingungen, Möglichkeiten der Schädigungsrechnung, usw.)
- Priorisierung der validierungsrelevanten Bauteilschadartkombinationen
- Erste Analyse der Schadensartverteilung und der relevanten schädigenden Betriebsbedingungen

Abbildung 1-19 zeigt den Aufbau der Modellierung und die Beschreibung von Systemebenen:

- Gesamtsystem (zum Beispiel Fahrzeug)
- System (zum Beispiel Motor, Getriebe, Fahrwerk)
- Subsystem oder Modul (zum Beispiel Kurbeltrieb, Ventiltrieb, Abgasstrang)
- Komponente (zum Beispiel Kolben, Pleuel, Kolbenring)

Gesamtsystem	➔	Fahrzeug			
System	➔	Motor	Kraftstoff- u. Auspuffsystem	Elektrische Anlage u. Anzeigergeräte	Getriebe
Subsystem	➔	Motorgehäuse	Kraftstoffsystem (Einspritzdüse, Leitung)	Beleuchtung, Signal, Schalter, Leitung	Sonstige Getriebe u. Getriebe-schmierung
	➔	Kurbeltrieb	Kraftstoffsystem (Einspritzpumpe)	Elektrische Maschinen u. Geräte	
	➔	Zylinderkopf	Kraftstoffsystem (Behälter, Leitungen, Pumpen)		
Komponente	➔	Liner	Einspritzdüse		
	➔	Kolben	Steckverbundung		
	➔	Ventil	AGR Kühler		

Abbildung 1-19: Aufbau der Systemebenen [4]

1.8.2 Applikationen und Zielwerte

Ziel der Reliability Target Allocation (RTA / Zuverlässigkeitszieldefinition) ist die Verteilung eines Zuverlässigkeitsziels auf Gesamtsystemebene auf die validierungsrelevanten Subsysteme und Komponenten. Die RTA basiert auf einem risikobasierten Top-Down-Ansatz. Dabei wird das Systemzuverlässigkeitsziel anteilig auf die relevanten Subsysteme und Komponenten unter Berücksichtigung von Innovations-, Produktionsrisiken sowie kommerziellen Risiken verteilt.

Im Gegensatz zu üblichen Qualitätszielen ermöglicht diese Methode eine verschärfte Zieldefinition für jene Subsysteme und Komponenten, welche unbekannt oder besonders kritisch sind. Somit wird sichergestellt, dass im Rahmen der Entwicklung diese Systeme zielgerichtet erprobt werden. Zusätzlich werden Dauerhaltbarkeitsziele (zum Beispiel ein B₁₀-Lebensdauerziel) auf Systemebene definiert und die relevanten Subsysteme und Komponenten abgeleitet.

Zusätzlich kommt die Nutzungsraumanalyse zum Einsatz, die eine Methodik zur systematischen Identifikation des Kundennutzungsraumes auf Basis der relevanten schädigenden Betriebsbedingungen ist. Durch die Bewertung der Intensität der Lastparameter unterschiedlicher Anwendungen können die Anwendungen im Nutzungsraum eingeteilt werden („kritische“ Kunden) und Gruppen von Anwendungen vergleichbarer Nutzung gefunden werden.

Der Nutzungsraum wird dabei durch möglichst wenige unabhängige Lastdimensionen beschrieben. Das Ziel der Analyse ist die Definition eines oder mehrerer Referenzzyklen für die Bewertung des Validierungsprogramms. Basis hierfür sind nicht nur Messdaten, sondern auch qualitative Größen wie etwa Start der Produktion (SOP) und das Produktionsvolumen. Zusätzlich kann das Ergebnis der Nutzungsraumanalyse als Input für eine DoE (Design of Experiments, statistische Versuchsplanung) -basierte Planung der Fahrzeugerprobung herangezogen werden.

1.8.3 Testprogramm und Belastungsanalyse

Die quantitative Belastungsanalyse (oder Schädigungsrechnung) wird in der Regel für validierungsrelevante Schadensarten durchgeführt. Basierend auf chemischen oder physikalischen Hintergrund werden mathematische Modelle abgeleitet, welche das Schädigungsverhalten einer Komponente über der Zeit beschreiben.

Für die Validierungsplanung werden, wie schon im Kapitel 1.3 erklärt, unterschiedliche Arten von Schädigungsmodellen eingesetzt.

Diese Modelle werden für die Bestimmung von Raffungsfaktoren verwendet, welche wiederum für die Bewertung des Testprogrammes herangezogen werden.

$$\text{Raffungsfaktor [\%]} = \frac{\text{Schädigung im Test pro Stunde}}{\text{Schädigung im Referenzzyklus pro Stunde}} * 100$$

Gleichung 2: Raffungsfaktor im Fall linearer Schädigungsakkumulation

1.8.4 Auswertung und Optimierung

Für die AVL Load Matrix™ Auswertung werden die Testbeiträge der validierungsrelevanten Schadensarten analysiert und die nachweisbare Zuverlässigkeit berechnet. Als erstes ist es das Ziel, Lücken (oder Risiken) im Absicherungsprogramm zu detektieren. Im Weiteren wird das Potential, die nachweisbare Zuverlässigkeit des Testprogramms, zu ausgewählten Meilensteinen dargestellt. Auf Basis dieser Auswertung werden technische und statistische Optimierungsschritte definiert. Ziel ist es dabei, ein optimiertes Testprogramm abzuleiten, welches die relevanten Schadensarten in Bezug auf Zuverlässigkeit und Dauerhaltbarkeit mit einem geringen Restrisiko abdeckt.

Die Auswertung des optimierten Testprogramms zeigt die Wirksamkeit der empfohlenen Maßnahmen in Bezug auf Dauerhaltbarkeitsdemonstration und nachweisbarer Zuverlässigkeit.

1.8.5 Rolle von Referenzzyklen in der AVL Load-Matrix™

Wie schon in Kapitel 1.8.3 erwähnt, bedient sich die AVL Load Matrix™ bei der Analyse des Testprogramms an Referenzen. Bei der Bewertung wird der Raffungsfaktor berechnet. Dieser gibt Aufschluss, wie gut ein Testzyklus bezogen auf seine Referenz für die betroffene Bauteilschadartkombination ist. Daraus resultiert, dass die Qualität des Referenzzyklus direkten Einfluss auf den Raffungsfaktor hat.

Ein niedriger Raffungsfaktor ($RF < 1$) bedeutet einen hohen Wert der Schädigung im Referenzzyklus. Dies stellt dar, dass der Referenzzyklus eine höhere schädigende Wirkung auf das Bauteil im Vergleich zum Test hat.

Im Gegensatz dazu bedeutet ein hoher Raffungsfaktor ($RF > 1$), dass der Referenzzyklus eine geringere schädigende Wirkung im Vergleich zum Test aufweist.

Wählt man den Referenzzyklus zu fordernd, läuft man Gefahr, das System zu übertesten. Dies verursacht gegebenenfalls hohe Kosten und einen großen Zeitaufwand, wobei der Mehrwert eventuell nicht gegeben ist.

Wählt man den Referenzzyklus jedoch zu schwach, kann es passieren, dass gegebenenfalls das Testprogramm zu wenig umfassend gewählt wird. Dadurch werden einzelne Schädigungen nicht ausreichend getestet, was wiederum ein erhöhtes Ausfallrisiko im Kundenbetrieb bedeuten kann. Im Gegensatz zu typischen Referenzzyklen kann das Testprogramm schnell und kostengünstig abgearbeitet werden, wobei dies aber ein erhöhtes Risiko durch eine geringere Absicherung bedeutet.

Aus diesem Vergleich der zu fordernd beziehungsweise zu schwach gewählten Referenzzyklen wird deutlich, dass der Referenzzyklus einen großen Einfluss auf das Testprogramm hat. Am Ende obliegt es dem Hersteller, für welche Variante er sich entscheidet.

Aus diesem Grund ist die Wahl der „richtigen“ Referenzzyklen eine starke Herausforderung.

1.9 Hintergrund zur Validierung von Traktoren

Da sich die Diplomarbeit im Speziellen mit Traktoren befasst, sollen im Folgenden einige traktorspezifische Besonderheiten dargelegt werden, welche die Validierung solcher Fahrzeuge maßgeblich beeinflussen.

Im Bereich von PKW und LKW sind die Anwendungen von Referenzzyklen bereits im ausreichenden Maß erforscht bzw. vorhanden, da die Antriebsleistung des Motors hauptsächlich in den Vortrieb bzw. in Nebenaggregate (wie zum Beispiel Wasserpumpe, Klimakompressor sowie Luftkompressor beim LKW) verteilt wird.

Bei einem Traktor sind diese Leistungsverzweigungen der einzelnen Abnehmer um ein Vielfaches komplexer. In Abbildung 1-20 sieht man schematisch den Leistungsfluss vom Motor zur Frontzapfwelle, zur Arbeitshydraulik und zum Nebenaggregat weiter über das Getriebe zu Heckzapfwelle, sowie zur Vorder- und Hinterachse.

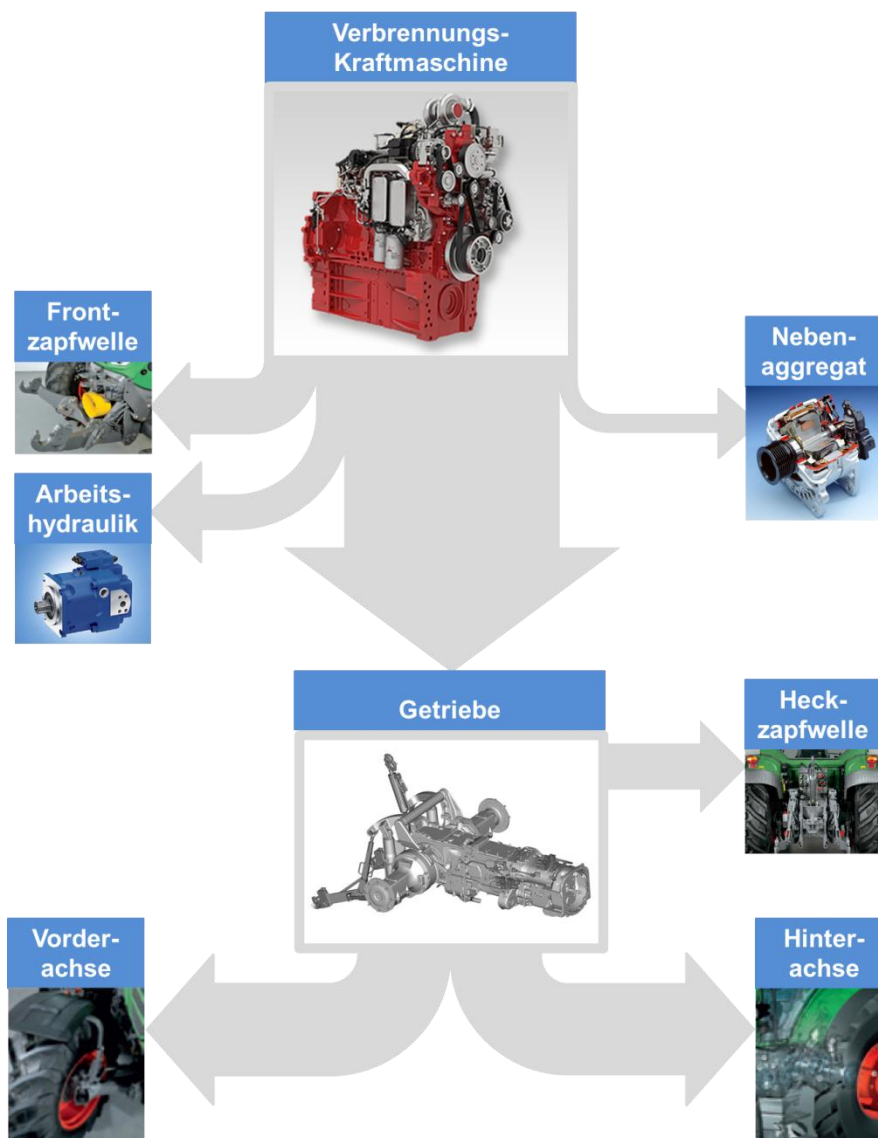


Abbildung 1-20: Leistungsflussdiagramm eines modernen Traktors

Da diese Verbraucher in unterschiedlicher Weise je nach Anwendung und Leistungsklasse kombiniert betrieben werden können, resultiert daraus die sogenannte Applikationsmatrix.

1.9.1 Applikationsmatrix

Die Applikationsmatrix ist ein wichtiger Input zur Generierung von Referenzzyklen. Je nach Leistungsklasse werden unterschiedliche Anwendungen schlagend. Idealerweise sollte von jeder dieser Anwendungen eine ausreichende Anzahl von Messfahrten zu Verfügung stehen, um den Referenzzyklus möglichst kundennahe abbilden zu können.

Traktorapplikationen	Gruppierung nach Art des Abtriebes				Gruppierung nach Art des Kunden					Gruppierung nach Leistungsklasse					
	PTO		Fahrtrieb		Hydraulik		klein	mittel	groß	Kommune	Lohnunternehmer	bis 60 PS	bis 120 PS	bis 200 PS	über 200 PS
	ja	nein	ja	nein	ja	nein									
Grünland															
Mähen	x		1		1		x	x	x		x	x	x	x	
Zetten	x		1			x	x	x			x				
Schwaden	x		1			x	x	x		x	x				
Ladewagen	x		1		1		x			x	x				
Pressen (rund)	x		1		1		x			x					
Pressen (quader)	x		1		1					x			x	x	
Wickeln	x			x	2		x	x		x	x		x		
Silowalzen	x		1		2		x	x		x		x	x		
Mulchen	x		1			x	x	x	x	x		x	x		
Böschungsmähen	x		1		2		x		x	x			x		
Schleppen / Striegeln		x	1			x	x	x			x				
Düngen															
Düngerstreuer	x		1			x	x	x			x	x			
Gülle Fahren	x		1			x	x	x		x		x	x		x
Güllemixer	x		1			x	x	x			x				
Mist Fahren	x		1		2		x	x	x	x	x	x	x	x	x
Bodenbearbeitung															
Pflügen		x	1			x	x	x		x		x	x	x	x
Eggen		x	1			x	x	x		x		x	x		
Grubbern		x	1			x	x	x		x		x	x	x	
Scheibenegge		x	1			x	x	x		x			x	x	
Kreisellegge	x		1			x		x		x		x	x	x	x
Sähen	x		1			x	x	x		x		x	x		
Transport															
Anhänger		x	2		1		x	x	x	x	x	x	x	x	x
Abschiebewagen	x		2		2			x		x			x	x	
Frontlader		x	1		2		x	x		x		x	x		
Kippmulde		x	1		1		x	x		x		x	x		
Forst															
Seilwinde	x		1		1		x	x	x		x	x	x		
Forstanhänger	x		1		1		x	x	x	x		x	x		
Holzspalter	x			x		x	x	x		x		x			
Astsäge		x	1		2				x	x		x	x		
Holz Häckseln	x			x		x		x		x					x
Steinfräse	x		1			x			x	x					x
Notstromaggregat	x			x		x	x	x	x		x	x			
Winterdienst															
Schneepflug		x	2		1		x	x	x	x		x	x	x	
Schneefräse	x		1		1				x	x			x	x	
Streudienst	x		2		1		x	x	x	x			x		
Frontlader		x	1		2				x	x		x	x		
Kippmulde		x	1		1		x	x	x	x		x	x		

Abbildung 1-21: Applikationsmatrix am Beispiel Traktor

In Abbildung 1-21 ist eine solche Applikationsmatrix dargestellt. In den Zeilen sind sämtliche Anwendungen solcher Maschinen aufgelistet. Zusätzlich wurden diese Anwendungen in aus der Landwirtschaft kommend übliche Gruppen wie beispielsweise Grünland oder Bodenbearbeitung gegliedert. Die Spalten zeigen Gruppierungen wie zum Beispiel Abtriebsart, Kundengröße oder Größen der

Leistungsklassen. Unabhängig von der Art der Anwendung werden unterschiedliche Verbraucher unterschiedlich stark beansprucht.

1.9.1.1 Gruppierung nach Art des Abtriebes

Im Bereich der Grünlandapplikation am Beispiel „Mähen“ wird abhängig von der Neigung des Hanges sowie der Beschaffenheit des Untergrundes mit bzw. ohne Vorderantrieb gearbeitet. Des Weiteren treibt die Heckzapfwelle sowie (optional) die Frontzapfwelle das erforderliche Frontmähwerk an.

Als weiteres Beispiel wird „Pflügen“ aus dem Bereich der Bodenbearbeitung betrachtet. Hierfür ist ausschließlich der Vortrieb entscheidend, jedoch je nach Untergrundbeschaffenheit mit oder ohne Vorderradantrieb.

Schon anhand dieser beiden Beispiele ist klar zu erkennen, wie vielfältig das Einsatzgebiet solcher Traktoren aufgebaut ist.

1.9.1.2 Gruppierung nach der Leistungsklasse

Prinzipiell werden sämtliche Anbaugeräte in verschiedenen Größen (Variation der Arbeitsbreite) angeboten.

Bei einigen Applikationen ist es jedoch nicht sinnvoll, Traktoren der größten Leistungsklasse für leichte Operationen, wie zum Beispiel „Schwaden“ oder „Schleppen“, und wiederum Traktoren der kleinsten Leistungsklasse für schwere Operationen, wie zum Beispiel „Pressen“ oder „Häckseln“, einzusetzen.

1.9.1.3 Gruppierung nach Art des Kunden

Eine weitere Unterteilung kann nach der Größe des Kunden gemacht werden. Diese erstreckt sich von Klein- bis Großbetrieben über Lohnunternehmen bis hin zu Kommunen. Der Unterschied dieser Kunden liegt hauptsächlich im Unterschied der Einsatzzeit der Fahrzeuge, aber es spielen auch unterschiedliche Fahrer bzw. Nutzungsmuster eine erhebliche Rolle.

1.10 Definition benötigter Fahrzeugmessdaten

Ziel ist die Definition der erforderlichen Fahrzeugmessungen für die Auswahl von Referenzzyklen. Dabei sollten die Fahrten bezüglich der Anwendung gut verteilt sein, um potentielle Endkunden repräsentativ darstellen zu können.

1.11 Zusammenfassung

1.11.1 Wir suchen validierungsrelevante Kunden (Definition)

Prinzipiell kann der validierungsrelevante Kunde nicht klar definiert werden. Es gibt aber dennoch Unterscheidungsmerkmale.

Zum einen kann dies durch die Frage: „Was macht die Masse?“ beantwortet werden. Dabei hängt es sehr stark vom Hersteller ab, ob dieser ausreichend Informationen hat, wie die später verkauften Fahrzeuge eingesetzt werden.

Eine weitere Herangehensweise ist die Suche nach dem schädigendsten Verhalten. Dabei ist die breite Masse nicht mehr ausschließlich dafür ausschlaggebend, sondern diejenigen Kunden, die entsprechende Komponenten- oder Systemausfälle gehäuft hervorrufen. Dies können Endkunden sein, die ihr Fahrzeug in Grenzbereichen des Motors betreiben. In Abhängigkeit der betrachteten Schädigung kann dies durchaus auch auf die breite Masse zutreffen. Als Beispiel sei hier der Kaltstart im Winter genannt.

1.11.2 Wie finden wir diese Kunden?

Die Informationen über diese validierungsrelevanten Kunden kommen idealerweise vom Hersteller selbst, da dieser den Einsatz der Fahrzeuge seiner Endkunden am besten abschätzen kann.

Ein weiterer Aspekt ist die Expertenerfahrung. Dabei wird im Rahmen von Expertendiskussion versucht, diese validierungsrelevanten Kunden zu definieren. Dabei können konkrete Probleme / Eigenschaften hinsichtlich eines bestimmten Marktes eine Rolle spielen.

1.11.3 Parameter zum Beschreiben dieser Kundentypen

Die breite Masse kann am besten durch statistische Methoden analysiert werden. Voraussetzung dafür ist natürlich eine Vielzahl von Messdaten sowie eine möglichst große Variation der Anwendungen. Meist sind diese Informationen jedoch sehr rar und es muss somit eine andere Variante zur Beschreibung dieser validierungsrelevanten Kunden gewählt werden.

Ein Beispiel dafür ist die sogenannte Schädigungsrechnung, wie in Kapitel 1.3 schon ausführlich beschrieben. Dabei spielen in erster Linie Drehmoment, Drehzahl und die Vollastkurve des im Fahrzeug verbauten Motors eine Rolle.

Alles in allem ist die Suche nach dem validierungsrelevanten Kunden eine große Herausforderung und wird nun an einem konkreten Beispiel im Hauptteil, sprich in den nächsten Kapiteln, näher erklärt.

2 Erstellen eines Traktorreferenzzyklus an einem konkreten Beispiel im Sinne der Schädigung

Für die vorliegende Arbeit wurden Messdaten eines konkreten Fahrzeuges herangezogen. Die technischen Daten davon sind wie folgt.

2.1 Technische Beschreibung

Das hierfür verwendete Fahrzeug befindet sich in der Leistungsklasse zwischen 60 und 120 PS. In dieser Klasse werden üblicherweise 4 Zylinder Motoren mit Abgasturbolader und Ladeluftkühler verbaut. Als Einspritzsystem werden wie bei modernen PKWs Common Rail Systeme verbaut. Der Hubraum kann mit circa vier Liter beziffert werden. Um den aktuellen Abgasvorschriften (Tier4i) gerecht zu werden, kommen Systeme, wie zum Beispiel Abgasrückführung samt Kühler zur inneren Abgasnachbehandlung sowie Oxidationskatalysatoren zur äußeren Abgasnachbehandlung, zum Einsatz.

In der folgenden Tabelle, Tabelle 2-1, sind diese technischen Daten übersichtlich aufgeschlüsselt.

Benennung	Einheit	Wert / Spezifikation
Zylinderanzahl	[-]	4 in Reihe
Aufladung	[-]	Turbolader mit LLK
Einspritzsystem	[-]	Common Rail
Hubvolumen gesamt	[l]	4
Treibstoffart	[-]	Diesel
Abgasnachbehandlung	[-]	DOC
AGR System	[-]	AGR mit Kühler
Emissionsstufe	[-]	TIER4i

Tabelle 2-1: Technische Daten

Da es große Unterschiede bezüglich des Marktes (geographische Lage, Einsatzgebiete, etc.) gibt, ist zur Erstellung der Zyklen der Zielmarkt klar zu definieren. Darauf wird im folgenden Kapitel näher eingegangen.

2.2 Kundenprofile / Applikationsmatrix

Idealerweise kann der Hersteller genau sagen, wie und wo der Endkunde sein Fahrzeug betreiben bzw. einsetzen wird. Als Entscheidungshilfe kann die Applikationsmatrix, wie in Kapitel 1.9.1 erklärt, herangezogen werden. Diese wird hier bereits auf Basis der in diesem Anwendungsfall relevanten Zielfahrzeugparameter eingeschränkt dargestellt.

Traktorapplikationen		Gruppierung nach Art des Abtriebes	PTO		Allrad-antrieb		Hydraulik	
			ja	nein	ja	nein	ja	nein
Grünland								
	Mähen	x		x				x
	Ladewagen	x		x		x		
	Pressen (rund)	x		x		x		
	Wickeln	x			x	x		
	Silowalzen	x		x				x
	Mulchen	x		x				x
Düngen								
	Düngerstreuer	x		x				x
	Gülle Fahren	x		x				x
	Mist Fahren	x		x		x		
Bodenbearbeitung								
	Pflügen		x	x				x
	Eggen		x	x				x
	Kreiselegge	x		x				x
	Sähen	x		x				x
Transport								
	Anhänger		x		x			x
	Frontlader		x		x	x		
	Kippmulde		x		x	x		
Forst								
	Seilwinde	x		x		x		
	Forstanhänger	x		x		x		
	Holzspalter	x			x			x
	Astsäge		x	x		x		
	Notstromaggregat	x			x			x
Winterdienst								
	Schneepflug		x	x		x		
	Frontlader		x	x		x		
	Kippmulde		x	x		x		

Tabelle 2-2: Applikationsmatrix bis 120PS

Je nach Einsatzort und Anwendung des Fahrzeuges vom Endkunden sollte vom Hersteller entschieden werden, in wie weit diese Tabelle befüllt wird. Dies bedeutet, dass je nach Einsatz des Fahrzeuges Messfahrten durchgeführt, bzw. Messdaten der jeweiligen Anwendung zu Verfügung gestellt werden müssen.

Je nach Einsatzgebiet (Grünland, Bodenbearbeitung, etc.) sollte zumindest jeweils ein Repräsentant bereitgestellt werden.

Im **Bereich Grünland** sind diese Anwendungen:

- Mähen
- Pressen

Bereich Bodenbearbeitung:

- Pflügen
- Kreiselegge

Bereich Transport:

- typischer Vertreter

Der **Bereich Düngen** kann in speziellen Fällen vernachlässigt werden, da dieser Bereich bezüglich der Belastungssituation stark mit dem Bereich Transport korreliert.

Der **Bereich Forst** wird je nach Einsatzort des Fahrzeuges vom Endkunden beeinflusst. Es gibt jedoch auch hier einige Überschneidungen mit den oben genannten Bereichen und deshalb muss vom Hersteller entschieden werden, in wie weit dieser Bereich in die Erarbeitung der Referenzen einfließt.

Ähnliches gilt für den **Bereich Winterdienst**. Auch hier gibt es einige äquivalente Anwendungen aus obigen Bereichen. Die einzige aber nicht vernachlässigbare Randbedingung stellt hier die Umgebungstemperatur dar. Diese wirkt sich bei extremen Bedingungen auf diverse BSK negativ aus und es sollte wiederum mit dem OEM abgeklärt werden, ob dieser Einfluss beim Endkundeneinsatz schlagend wird.

Ein zusätzlicher Input für die Erstellung von Referenzzyklen ist das sogenannte Lastkollektiv. Dabei wurde im konkreten Fall das Fahrzeug eines typischen Endkunden über einen längeren Zeitraum, idealerweise zumindest über ein Jahr, mit Messequipment ausgestattet und jede Fahrt dokumentiert. Nach der Auswertung der Daten kam man im konkreten Fall zu folgendem Ergebnis:

Einsatz	Verteilung in %
Grünland	15%
Bodenbearbeitung	20%
Düngung	0%
Transport	35%
Forst	10%
Winterdienst	0%
Leerlauf	20%

Tabelle 2-3: Verteilung des Einsatzes

Tabelle 2-3 zeigt das Lastkollektiv eines typischen Kunden im realen Einsatz. Dabei handelt es sich jedoch um eine exemplarische Verteilung der Einsätze, wobei die Verteilung je nach Größe des Endkunden variieren kann.

Dabei ist zu erkennen, dass neben dem Bereich Transport auch der Bereich Bodenbearbeitung eine große Rolle im Referenzzyklus spielen wird. Weiters ist zu bemerken, dass der Bereich Leerlauf mit 20% vertreten ist. Anzumerken ist an dieser Stelle, dass der Leerlauf unabhängig von den weiteren Einsätzen behandelt wird und somit aus allen anderen für den Referenzzyklus notwendigen Bereichen entfallen kann. Der Bereich Bodenbearbeitung beträgt ebenfalls 20%. Die Bereiche Grünland (15%) und Forst (10%) runden das Kollektiv ab.

2.3 System Analyse und benötigte Mess-Kanäle

Die System Analyse ist ein weiterer Input, der zur Definition von Referenzzyklen benötigt wird. Dabei handelt es sich um das sogenannte FP-Blatt (Fehler-Parameter-Blatt). Die Befüllung geschieht in enger Zusammenarbeit mit dem OEM. Dieser definiert, welche BSK näher betrachtet werden sollten bzw. bei welchen Schadensarten keine Probleme mehr erwartet werden.

FP-File							(Sub)System parameter	Damage model
No. Subsystem/ Component	Failure mode	Failure location	Cause of failure	Effect on system level	Damaging operating			
Engine								
Assembly Crankcase								
Crankcase / Bedplate / Ladder Frame								
1	crankcase wear	sealing surfaces crankcase to connected parts	thermal and mechanical load	oil and coolant leakage to ambient, (engine failure)	high load	engine speed, engine torque	38) Load Cycles Power Tau 200, 42) Load Cycles Torque Tau 200	
Cylinder liner								
2	liner wear	top ring reversal point	mechanical load at starved lubrication	increase of oil consumption	high load	engine speed, engine torque, PFP map	56) Wear Pfp	
3	liner deformation	liner	thermal and mechanical load together with residual stresses from casting (influenced by casting temperature treatment)	increase of oil consumption	high load	Engine speed, engine torque	13) TB High Power, 2) TB High Rel. Torque	
Assembly Cranktrain								
Connection rod								
4	connection rod wear	running surface of conrod bearings (small and big end)	mechanical load	engine failure	high load	engine speed, engine torque	24) Events High Rel. Torque at Low Speed	
Piston								
5	piston high cycle fatigue (HCF)	piston bowl	mechanical & thermal load (combustion pressure)	engine failure	high load	engine speed, engine torque, PFP map	55) HCF Pfp	
6	piston high cycle fatigue (HCF)	piston pin boss	mechanical & thermal load (combustion pressure and inertia)	engine failure	high load	engine speed, engine torque, PFP map	55) HCF Pfp	
7	piston wear	piston skirt	mechanical load, oil quality, oil viscosity (high temperature)	engine failure	high load / high speed	engine speed, engine torque	56) Wear Pfp 34) Events Motored High Speed	
8	piston ring wear	1st ring, 2nd (and 3rd ring)	bad oil quality in conjunction with mechanical load (contact pressure on running surface, starved lubrication), thermal load (high oil and water temperature)	increased loc and blow by	high load	engine speed, engine torque	56) Wear Pfp 24) Events High Rel. Torque at Low Speed	
9	piston ring scuffing	1st ring, 2nd (and 3rd ring)	thermal load & bad oil quality	engine failure	high load	engine speed, engine torque	19) Events High Rel. Torque 23) Events High Speed	

Tabelle 2-4: Auszug aus dem System Analyse - FP-Blatt

Am Ende der System Analyse steht das fertig befüllte FP-Blatt (Tabelle 2-4). In der Spalte „*Damage Model*“ ist das Schädigungsmodell definiert, welches für die Schädigungsrechnung herangezogen wird.

Des Weiteren wurden folgende schädigende Betriebsbedingungen, siehe in Tabelle 2-4 Spalte „*Damaging Operating Conditions*“, definiert:

- Cyclic Load
- High Load / High Speed
- High Load
- High Speed
- Low Speed
- Idle

Die Inputgrößen für die Schädigungsrechnung werden im nächsten Kapitel näher erklärt.

Für die Berechnung werden zeitbasierte Daten benötigt. Dabei gilt wie so oft beim Umgang mit großen Datenmengen – so fein wie möglich, so grob wie nötig. Da die Messfahrten der einzelnen Anwendungen oft einige Zeit dauern, reicht meist die Aufzeichnungsrate von 1Hz. Abhängig von der zu beschreibenden Schädigung ist teilweise aber auch eine höhere Auflösung notwendig.

Im konkreten Beispiel reichen lediglich die Mess-Kanäle von Drehmoment und Drehzahl sowie die Volllastkurve.

2.4 Durchführung der Messungen

Nach erfolgter Definition der Kundenprofile laut Applikationsmatrix sowie Implementierung der definierten Messstellen am Fahrzeug können die Messungen erfolgen.

In der Praxis stehen Messungen aus dem aktuellen Fahrzeug eher selten zu Verfügung. Aus diesem Grund werden oft schon vorhandene Messschriebe herangezogen. Dabei ist großer Wert auf eine gute Vergleichbarkeit des Zielfahrzeugs mit dem Messfahrzeug zu legen. Bei Bedarf kann hier auch eine Antriebsstrangsimulation unterstützen.

Am konkreten Beispiel waren wie so oft nur wenige Daten vorhanden. Die Kunst besteht nun darin, dennoch Zusammenhänge zu erkennen und daraus eine sinnvolle Referenz zu generieren.

Folgende Messschriebe standen zur Verfügung:

- Grünland: keine Daten vorhanden – Alternative: Wasserpumpe
- Bodenbearbeitung: Pflügen / Kreiselegge
- Transport: schwer / leicht
- Forst: Holzspalter
- Winterdienst: keine Daten vorhanden – wird nicht betrachtet, da Maschine des behandelten Beispiels bei dieser Anwendung nicht zum Einsatz kommt

2.4.1 Grünland

Wie schon erwähnt waren aus diesem Bereich keine Daten vorhanden. Es wurde jedoch vom Hersteller eine Ersatz-Anwendung gefunden, die laut Expertenwissen sehr dem des Mähens ähnelt.

Hierbei handelt es sich um den Antrieb einer Wasserpumpe. Bei dieser Anwendung handelt es sich ähnlich wie bei typischen Grünlandoperationen um einen konstanten Betriebszustand des Motors. Um die Wendemanöver am Ende des Feldes darstellen zu können, wurde während der Messaufzeichnungen der Wasserpumpenoperation der Motor in regelmäßigen Abständen in einen der Wendemanöver ähnlichen Betriebszustand versetzt. Dabei ändert sich zyklisch die Drehzahl beziehungsweise das Drehmoment, siehe Abbildung 2-1.

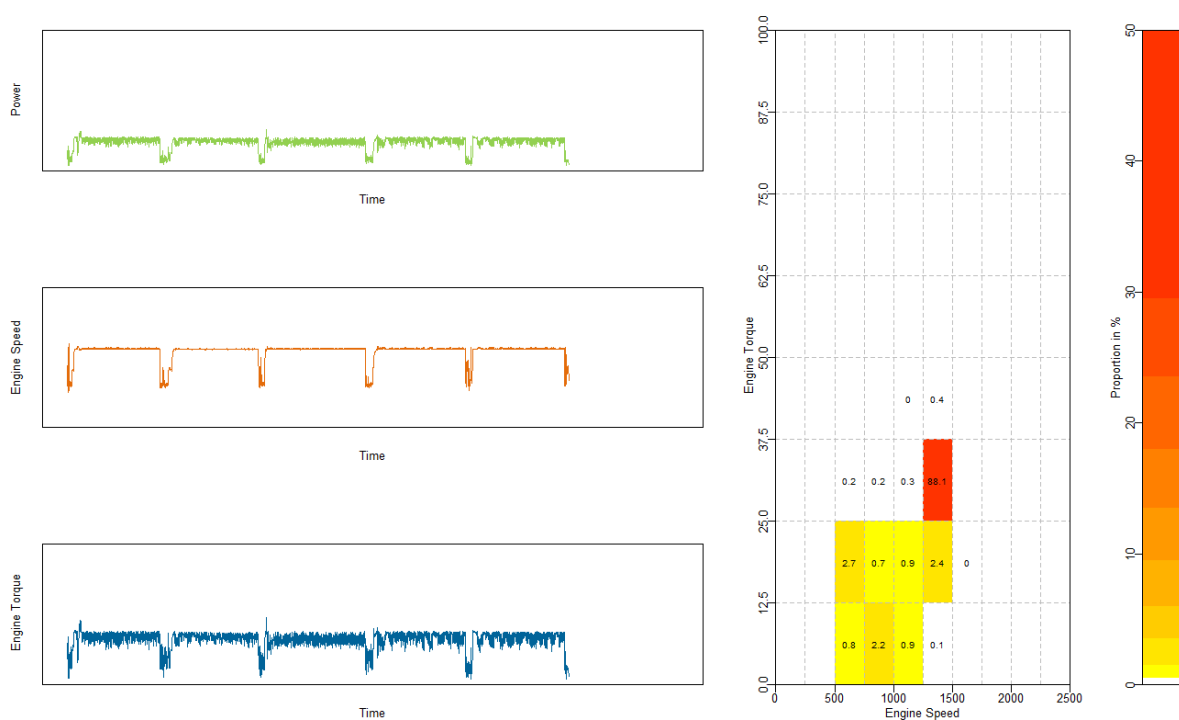


Abbildung 2-1: Beispiel einer typischen Grünlandanwendung

Diese Art der Anwendung ist sehr stark von der Wahl der PTO-Drehzahl abhängig.

Die Antriebsdrehzahl solcher Maschinen beträgt 450 U/min bis 540 U/min. Der Traktor verfügt über ein PTO-Getriebe mit drei Stufen:

- PTO540
- PTO540E (oder je nach Hersteller PTO750)
- PTO1000

Im vorliegenden Fall sind zwei dieser Zyklen vorhanden. Dabei handelt es sich um WP_1 und WP_2. Der Index 1 bzw. 2 stellt symbolisch Hoch- und Niederlast dieser Anwendung dar.

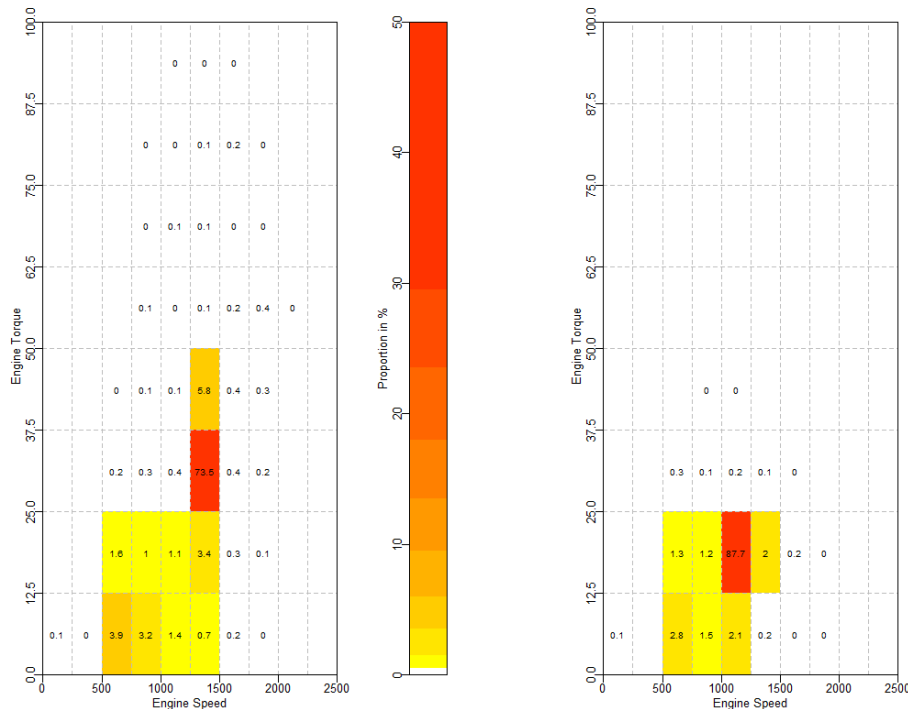


Abbildung 2-2: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment der Zyklen WP_1 (links) und WP_2 (rechts)

Die PTO540 kommt bei höherlastigen Anwendungen zum Einsatz. Dabei ist bei ca. 1500 U/min Motordrehzahl die Drehzahl am Abtrieb der PTO bei 540 U/min. Dies ist sehr deutlich in Abbildung 2-2 zu erkennen.

Die PTO540E wird bei niedrigerlastigen Anwendungen verwendet. Hierbei wird die geforderte Abtriebsdrehzahl der PTO von 540 U/min bereits bei einer verringerten Motordrehzahl von 1000 U/min bis 1200 U/min erreicht, siehe Abbildung 2-2.

2.4.2 Bodenbearbeitung

Bei der Bodenbearbeitung sind zwei Anwendungen vorhanden.

Zum einen ist dies die Anwendung Pflügen. Diese Art der Anwendung ist eine reine Zugoperation. Dabei bewegt sich die Maschine im maximalen Leistungsbereich.

Zum anderen ist es die Anwendung Kreiselegge. Diese Art der Anwendung ist hauptsächlich durch den Einsatz des PTO getrieben.

2.4.2.1 Pflügen

Typischerweise ist Pflügen eine hoch transiente Anwendung. In Abbildung 2-3 ist eine solche typische Anwendung dargestellt. Dabei wird die Maschine im obersten Bereich des Motorkennfeldes betrieben

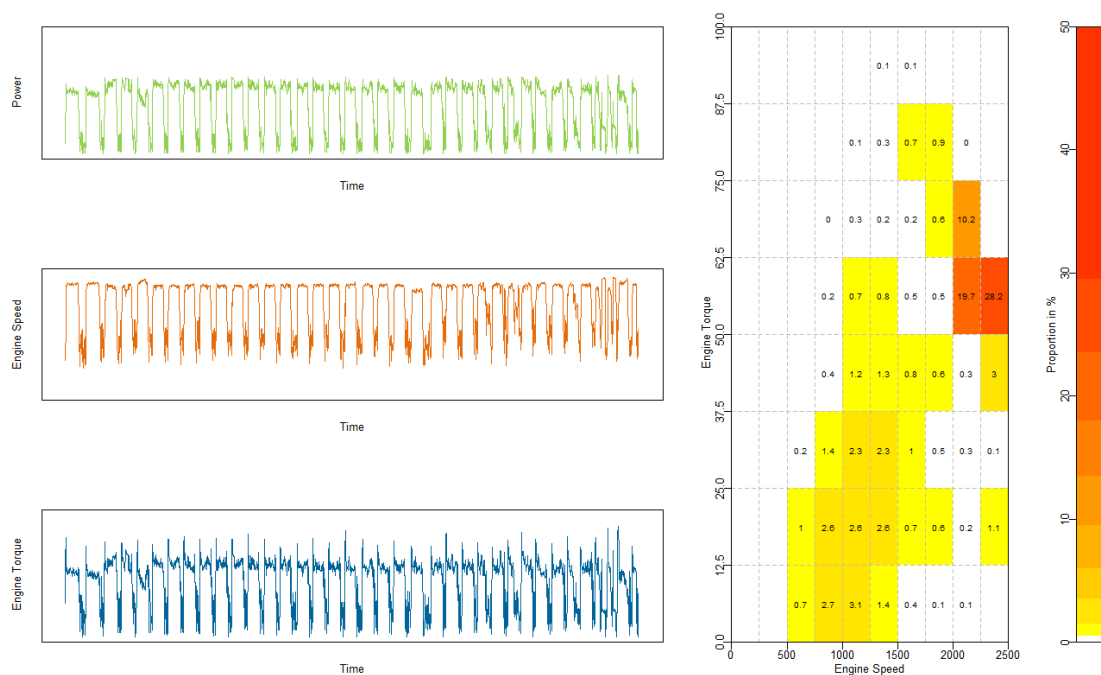


Abbildung 2-3: Beispiel einer typischen Pflügeanwendung

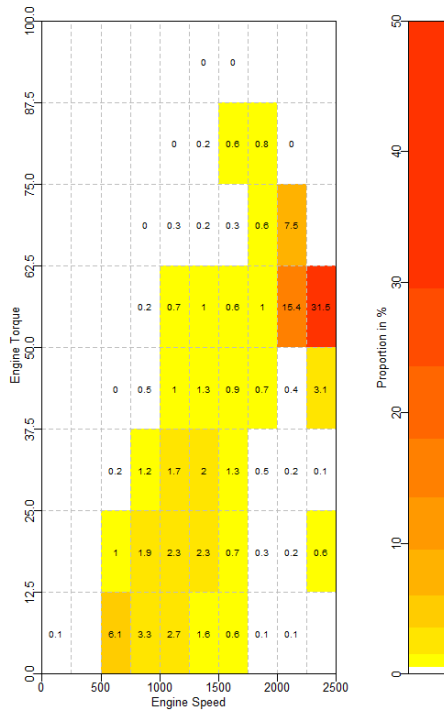


Abbildung 2-4: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment des Zyklus Pflügen

Im vorliegenden Fall ist nur einer dieser Zyklen vorhanden, siehe Abbildung 2-4. Dabei erkennt man den hohen Zeitanteil der Anwendung Pflügen im Bereich der Drehzahl zwischen 2000U/min und 2500U/min bei einer Auslastung des Drehmomentes von über 50%.

2.4.2.2 Kreiselegge

Ähnlich wie die Anwendung Pflügen ist auch die Operation Kreiselegge im Bereich der Bodenbearbeitung nicht zu vernachlässigen. Diese Art der Anwendung ist wieder, wie eingangs erwähnt, stark von der PTO Drehzahl abhängig, siehe Abbildung 2-5. Dabei erkennt man den konstanten Anteil der Drehzahl. Die Schwankungen des Drehmomentes kommen wiederum durch die Wendemanöver am Ende des Feldes zu Stande.

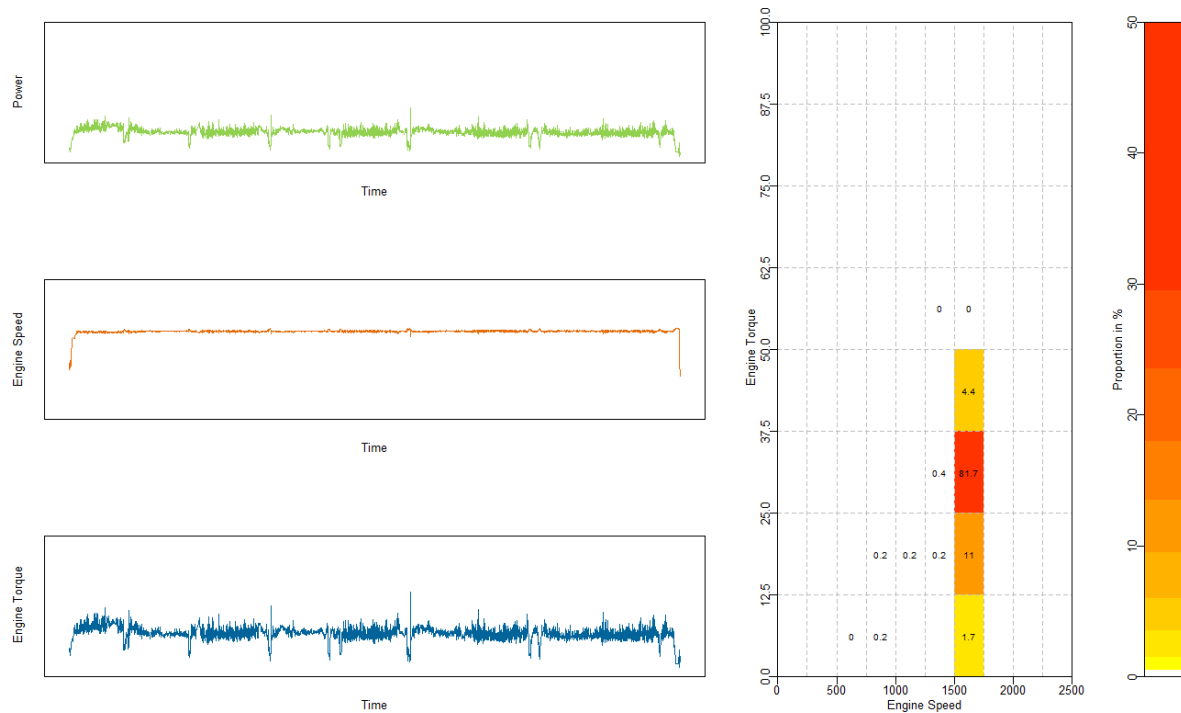


Abbildung 2-5: Beispiel einer typischen Kreiseleggenanwendung

Für diese Art der Anwendung standen zwei Zyklen zu Verfügung. Dabei handelt es sich um Harr_1 und Harr_2. Die Indizes 1 und 2 bedeuten jeweils eine Hoch- bzw. Niedriglastanwendung. Dies ist an den hohen Zeitanteilen um 1500 U/min erkennbar. Je nach Bodenbeschaffenheit erfährt die Maschine unterschiedliche Belastungen, wie in Abbildung 2-6 dargestellt ist. Dabei bezieht sich der Index auf die jeweilige Bodenbeschaffenheit.

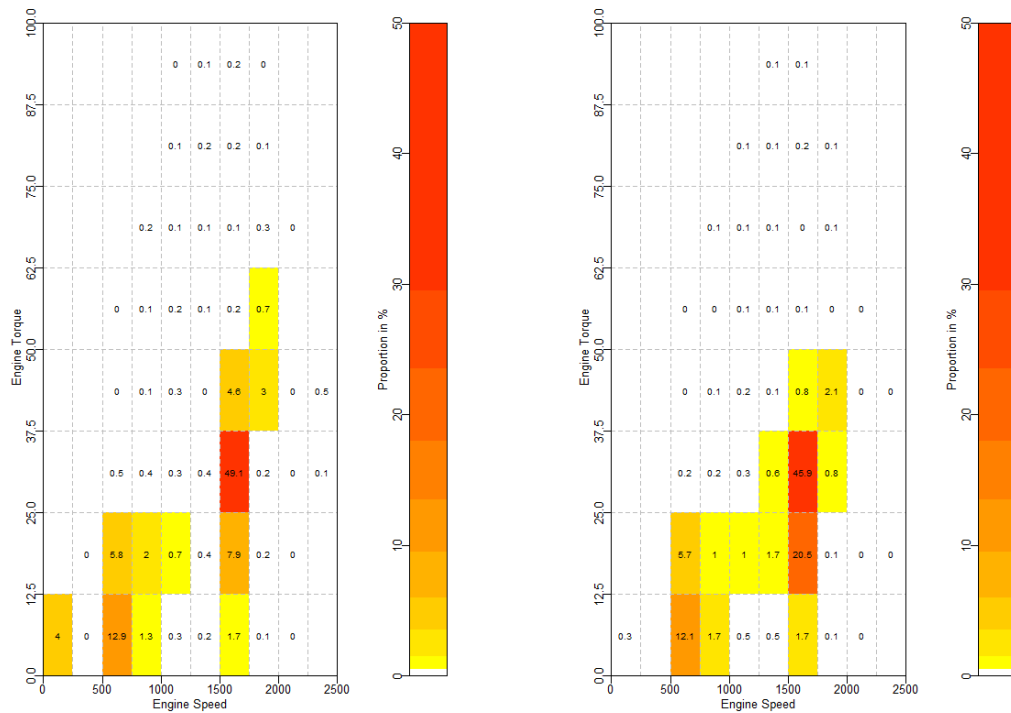


Abbildung 2-6: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment der Zyklen Harr_1 (links) und Harr_2 (rechts)

2.4.3 Transport

Der Transport stellt wie in Tabelle 2-3 dargestellt den größten Zeitanteil dar. Bei dieser Art der Anwendung herrscht auch die größte Variation von beispielsweise Transportgewicht (leer, teilweise oder voll beladen), Untergrund (Fahrt auf Straße oder Feld) oder Topographie (flaches oder hügeliges Gelände).

In Abbildung 2-7 ist als Beispiel eine typische Transportanwendung dargestellt. Dabei erkennt man im Zeitschrieb (links) transiente Drehzahl- und Drehmomentverläufe. Die hohen Leistungsanteile können als Bergauffahrten gedeutet werden. Daher erkennt man auch, dass die Auslastung des Motors sich über das gesamte Motorkennfeld streckt und sich im Bereich um 200U/min die höchsten Zeitanteile befinden.

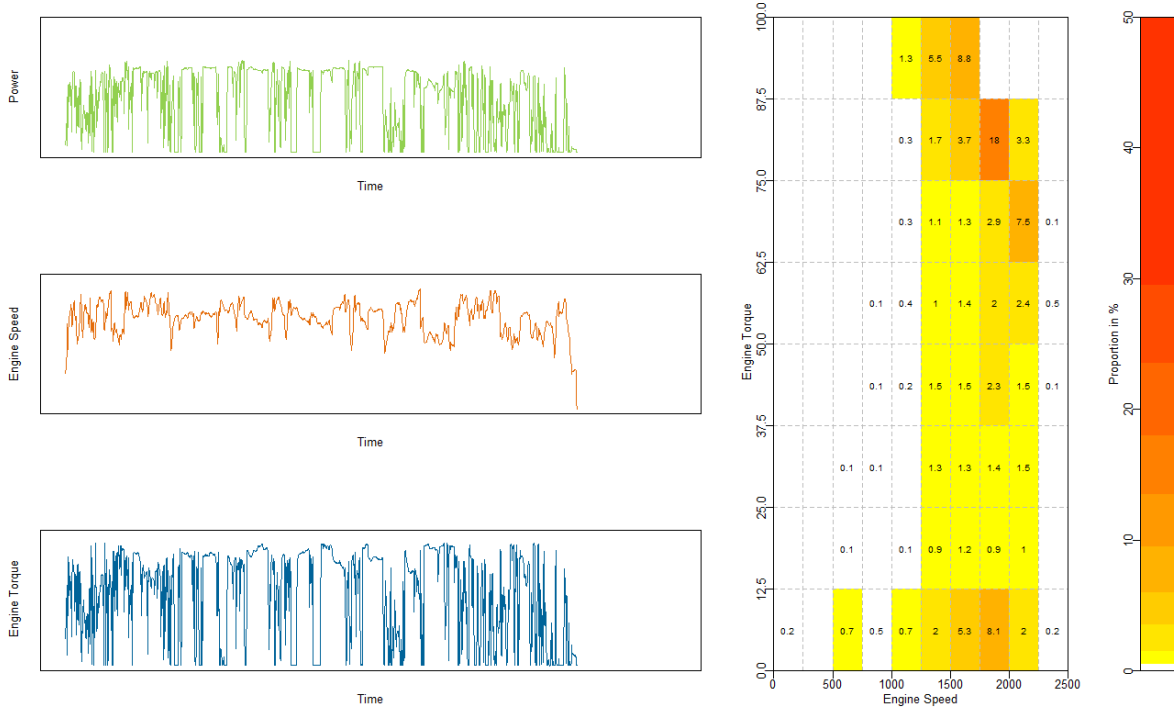


Abbildung 2-7: Beispiel einer typischen Transportanwendung

2.4.3.1 Schwerer Transport

Für diese Art der Anwendung standen drei Messfahrten zu Verfügung, siehe Abbildung 2-8. Beim schweren Transport wird die Maschine ähnlich wie bei der Anwendung Pflügen im Nennleistungsbereich bewegt. Der einzige Unterschied sind dabei die hohen konstanten Teilabschnitte sowie die höheren Geschwindigkeiten.

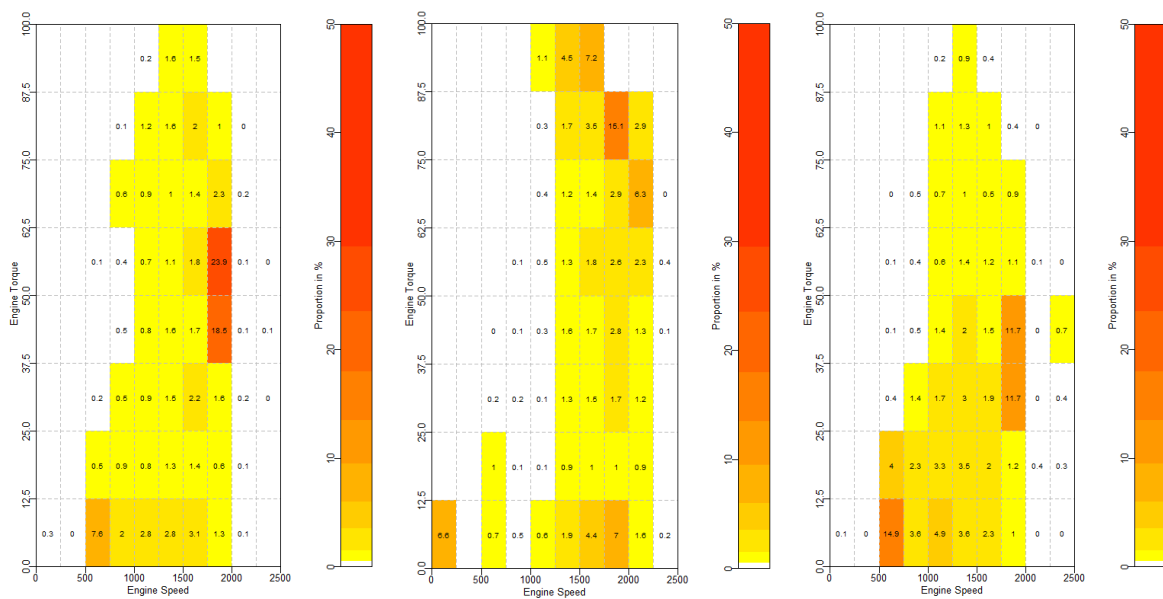


Abbildung 2-8: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment der Zyklen TP_H1 (links), TP_H2 (mitte) und TP_H4 (rechts)

2.4.3.2 Leichter Transport

Bei dieser Art der Anwendung wird, wie beim Transport üblich, das gesamte Motorkennfeld genutzt. Beim leichten Transport sind hohe Zeitanteile im Bereich Leerlaufdrehzahl, siehe Abbildung 2-9 links, sowie hohe Zeitanteile bei geringer Last, wie es in Abbildung 2-9 auf der rechten Seite zu erkennen ist, vorhanden.

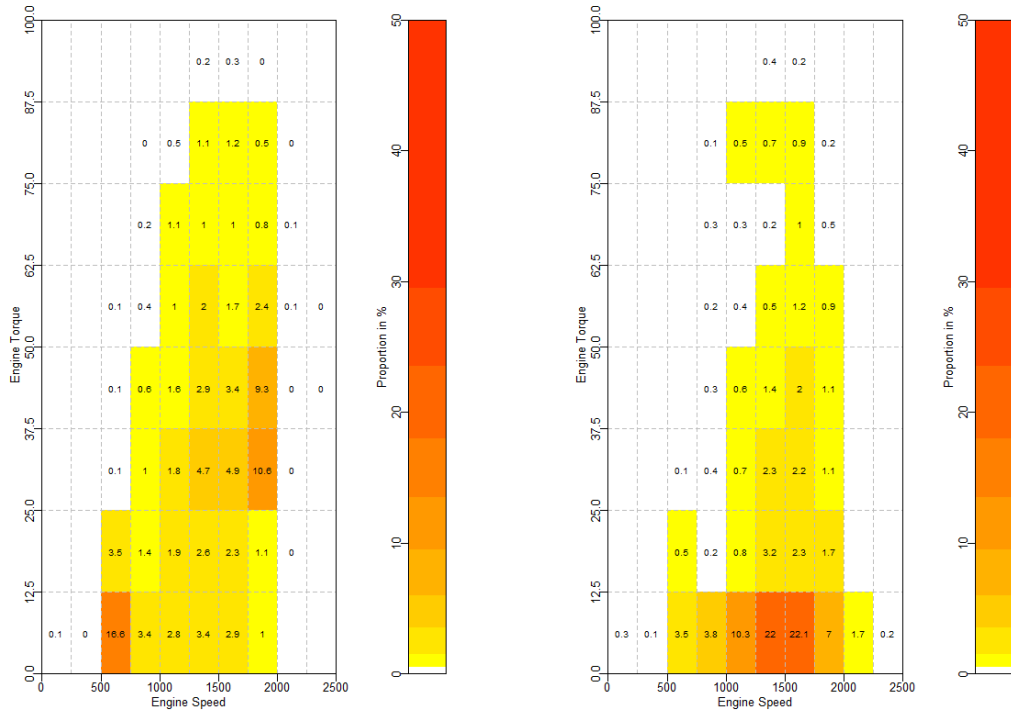


Abbildung 2-9: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment der Zyklen TP_L1 (links) und TP_L2 (rechts)

2.4.4 Forst

Dem Einsatz im Bereich Forst wird bei diesem Fahrzeug ebenso nur kleiner Teil beigemessen, vgl. Tabelle 2-3. Eine typische Anwendung aus diesem Bereich ist der Antrieb eines Holzspalters.

Diese Anwendung ist wieder PTO getrieben und tendenziell niedriglastig. Dabei wird PTO540E oder gar PTO1000 verwendet. Dies hat den Grund, dass der Motor im unteren Drehzahlbereich betrieben werden kann, was in weiterer Folge eine Verbrauchsminderung bedeutet. Dies wird auch von dem Messschrieb, wie in Abbildung 2-10 dargestellt, untermauert.

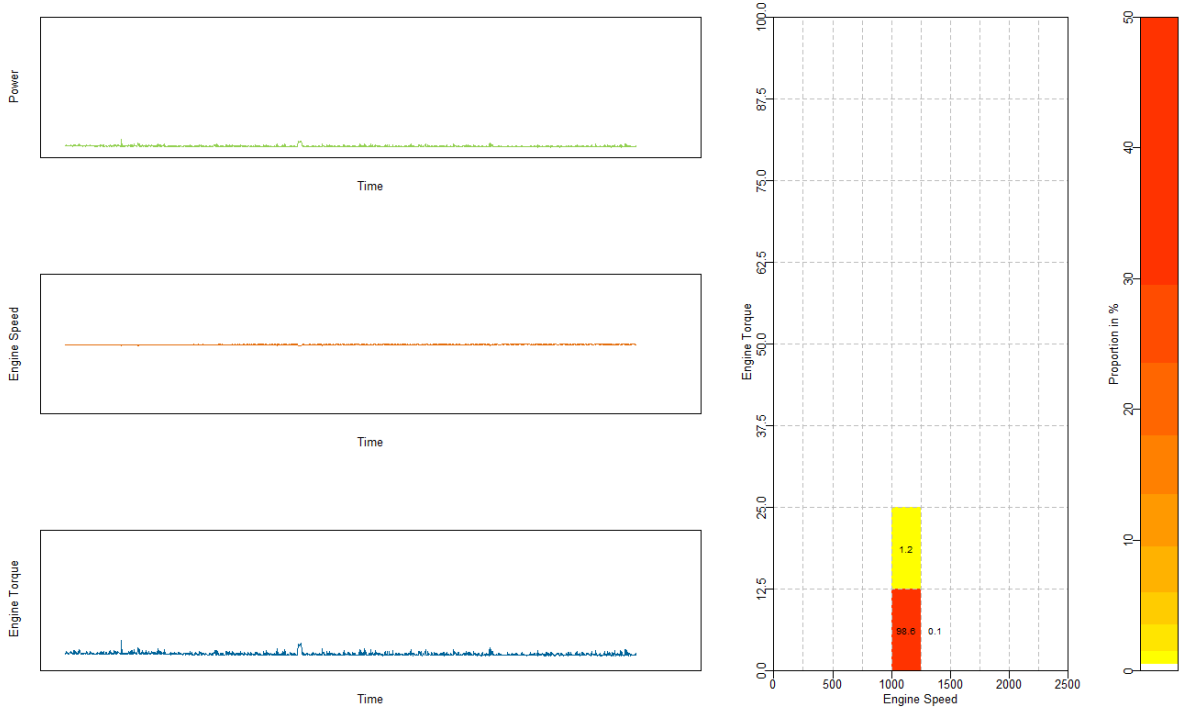


Abbildung 2-10: Beispiel einer typischen Holzspalteranwendung

Im vorliegenden Fall stand wiederum nur ein Zyklus dieser Anwendung zu Verfügung, siehe Abbildung 2-11.

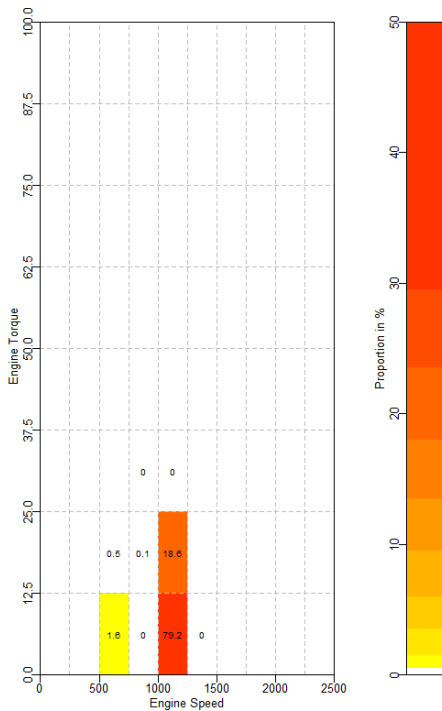


Abbildung 2-11: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment des Zyklus WC

2.4.5 Winterdienst

Wie schon eingangs erwähnt, wird in diesem Einsatzgebiet keiner der Maschinen betrieben werden, und somit sind auch keine Messschriebe vorhanden.

Es sollte jedoch erwähnt werden, dass gerade diese extremen Umweltbedingungen einen erheblichen Einfluss auf einige der Komponenten haben können. So kann es zum Beispiel beim Kaltstart der Maschine zu Problemen im Ölkreislauf kommen, die in weiterer Folge mangelnde Schmierung in Lagern hervorrufen. Weiters kann bei nichterreichten gewisser Temperaturniveaus aufgrund zu kurzer oder zu niedriglastiger Anwendungen der korrekte Betrieb von Abgasnachbehandlungssystemen nicht sichergestellt werden.

2.5 Auswirkungen der unterschiedlichen Anwendungen auf das Belastungskollektiv

Die Hochlastanwendungen wie zum Beispiel Pflügen oder Transport schädigen in erster Linie Bauteile, die sensibel auf hohe Drehzahlen und/oder hohe Drehmomente beziehungsweise damit einhergehende Größen wie Temperatur und Drücke reagieren. Beispiel hierfür sind Lager, Dichtungen oder Wellen.

Im Gegensatz dazu sind niedriglastige Zyklen wie Holzspalten oder Wasserpumpen schädigend für Systeme oder Komponenten, die für den optimalen Betrieb zum Beispiel ein gewisses Temperaturniveau benötigen. Vertreter hierfür sind Abgasnachbehandlungssysteme oder auch die Abgasrückführung, die bei zu geringen Temperaturen zu Versottung neigt.

Analoge Betrachtungen können auch für stationäre und auch dynamische Zyklen dargestellt werden.

Zusammenfassen kann gesagt werden, dass sich das Belastungskollektiv aus Sicht der Schädigungsgetriebenen Betrachtung aus Vertretern aus allen dieser Bereiche, seien es hoch- oder niedriglastige, sowie stationäre oder dynamische Zyklen zusammensetzen soll.

2.6 Erster Vergleich der Kollektivdaten

Ziel dieses Vergleiches ist eine erste Bewertung der Messdaten. Dazu wurden die Messschriebe in ein Drehzahl-Drehmoment-Kennfeld geplottet, siehe Abbildung 2-12.

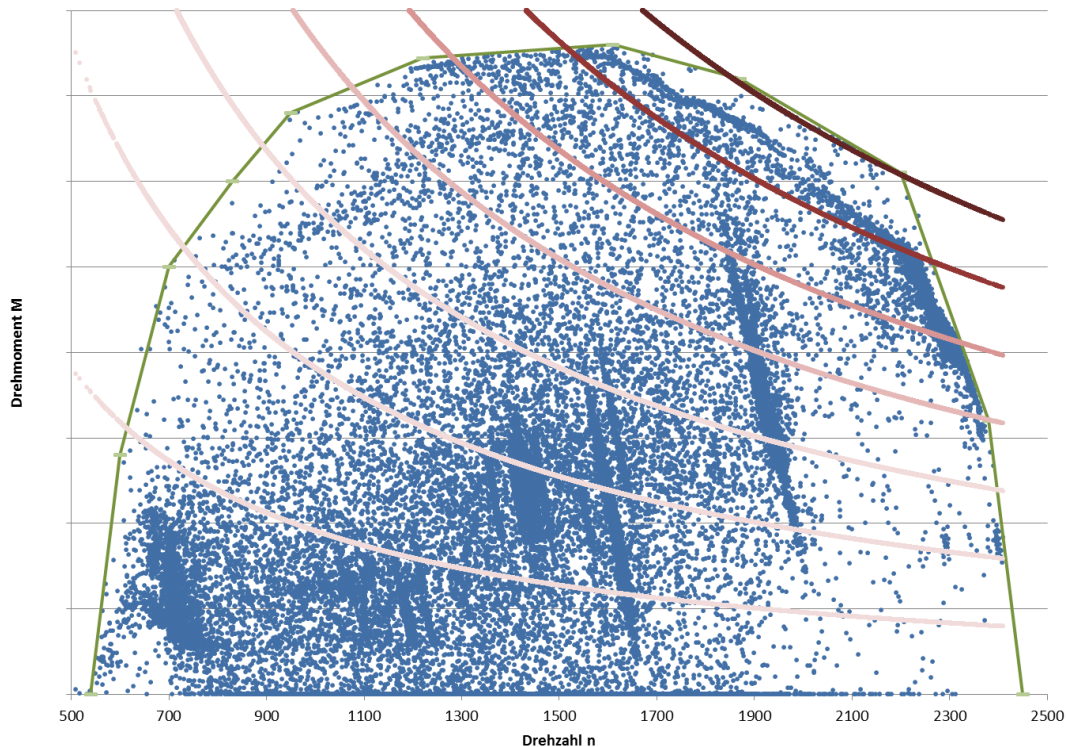
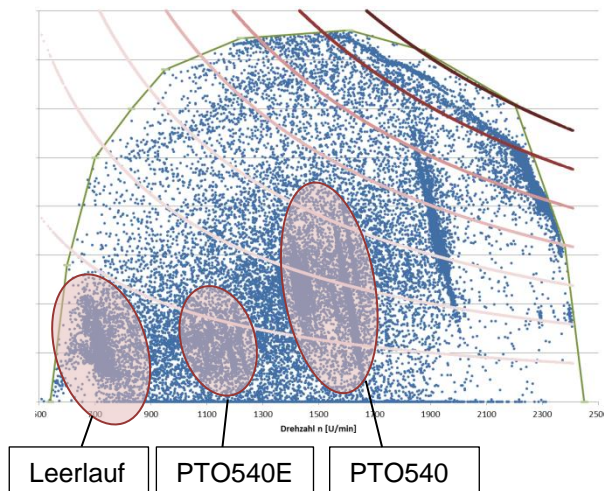


Abbildung 2-12: Plot der Lastpunkte der gesamten Messdaten im Motorkennfeld

Dabei entspricht jeder Punkt einer Sekunde mit einem bestimmten Drehmoment bei einer bestimmten Drehzahl. Die Volllastkurve sowie die Leistungshyperbeln komplettieren das Diagramm.

Anhand dieser Abbildung ist zu erkennen, dass Traktor aufgrund seiner verschiedenartigen Einsätze im gesamten Kennfeld des Motors bewegt wird. Einzig die Bereiche geringe Drehzahl bei hoher Last sowie hohe Drehzahl mit geringer Last weisen eine geringere Anzahl von Lastpunkten auf.

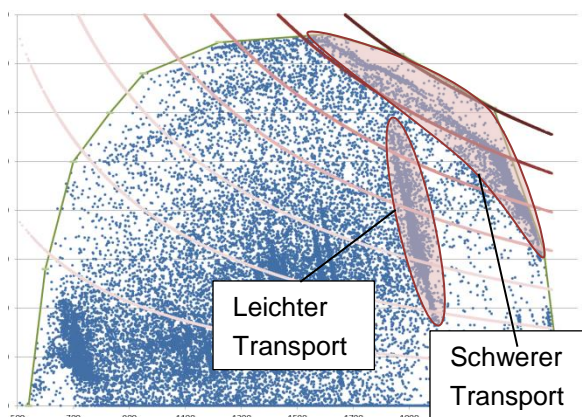
Leerlauf und PTO



In Abbildung 2-13 erkennt man eine gewisse Häufung der Messpunkte im Drehzahlbereich um 700 U/min (Leerlaufdrehzahl). Ebenso bei den Drehzahlen im Bereich um 1000 U/min (PTO540E) und im Bereich um 1500 U/min (PTO540) sind diese Häufigkeiten erkennbar.

Abbildung 2-13: Leerlauf und PTO im Kennfeld

Transport



In Abbildung 2-14 ist eine ebenso hohe Verteilung im Drehzahlbereich um 2300 U/min am Rand der Volllastkurve zu erkennen. Dabei handelt es sich um schwere Transportarbeiten. Die Häufung beim Drehzahlbereich um ca. 1900 U/min bis 2000 U/min lassen sich mit leichten Transportarbeiten erklären.

Abbildung 2-14: Transportarbeiten im Kennfeld

Generell ist zu bemerken, dass jede Art der Anwendung, sei es getrieben durch PTO am Beispiel Grünland, Bodenbearbeitung oder Forst, oder auch Bereiche aus Transport und Leerlauf berücksichtigt werden. Es ist somit nicht sofort zu erkennen, welcher der genannten Messschriebe zur Erstellung eines Referenzzyklus vernachlässigt werden kann.

Aus diesem Grund führt die Analyse zum nächsten Schritt, dem Kapitel der Schädigungsrechnung.

2.7 Anwenden der Schädigungsrechnung

Wie schon in der Theorie (Kapitel 1.3) der Schädigungsrechnung behandelt, wird hier auf Basis der Messergebnisse aus den vorhin definierten Kanälen die Simulation durchgeführt.

Die Kanäle für die Erfassung der Messdaten sind:

- Drehzahl
- Drehmoment
- Vollastkurve

Aus dem FP-Blatt (Tabelle 2-4) geht auch die Definition der Schädigungsmodelle hervor.

Diese sind wie folgt eingeteilt:

- Zeitbasierte Modelle (timebased); als Einheit [%]
- Eventbasierte Modelle (eventbased); als Einheit [1/h]
- Rainflow Modelle; als Einheit [1/h]

Zeitbasierte Modelle

Als Ergebnis liefern zeitbasierte Modelle die Verweildauer der einzelnen Zyklen in den jeweils schädigenden Betriebszuständen. Das Ergebnis wird als prozentualer Anteil der einzelnen Punkte bezogen auf die Gesamtlänge des Tests dargestellt.

Eventbasierte Modelle

Das Ergebnis aus den eventbasierten Modellen liefert wie der Name schon sagt die Anzahl der schädigenden Ereignisse pro Zeiteinheit und wird im vorliegenden Fall auf eine Stunde bezogen.

Beispielsweise gibt das Modell **18- High Rel. Torque at Low Speed** die gewichtete Anzahl der Umdrehungen bei hohem Drehmoment pro Zeiteinheit an.

$$D = \frac{\sum w_1(n_i) * w_2(T_i)}{t}$$

Gleichung 3: Schädigung eines eventbasierten Modells

Dabei sind w_1 und w_2 Gewichtungen in Abhängigkeit von Drehzahl n_i bzw. Drehmoment T_i und t die Gesamtdauer des Zyklus.

Rainflow Modelle

Das Ergebnis aus den Rainflow Modellen liefert die Anzahl der Belastungshysteresen pro Zeiteinheit und wird im vorliegenden Fall auf eine Stunde bezogen.

Der Unterschied zu den eventbasierten Modellen wird am Modell **42- Load Cycles Torque Tau 200** genauer erklärt. Dieses Modell liefert die Anzahl der Amplituden (Drehmoment) über die Zeit, siehe Abbildung 2-15.

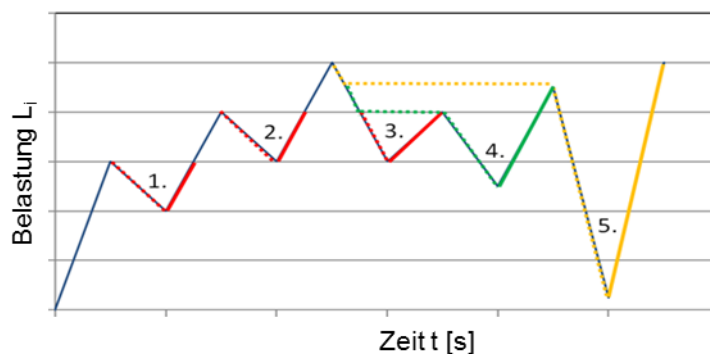


Abbildung 2-15: Schematische Darstellung Rainflow Analyse

Der genaue Ablauf dieser Simulation ist nicht Teil dieser Arbeit und wird somit nicht weiter behandelt.

Folgende Modelle werden im konkreten Fall schlagend:

- Events Weighted High Rel. Torque
- Events High Rel. Torque at Low Speed
- Wear PFP
- TB High Rel. Torque
- Events High Rel. Torque
- HCF PFP
- TB High Torque
- TB High Power
- Events High Speed
- Load Cycles Torque Tau 200
- Load Cycles Power Tau 200
- TB Idle
- Events Idle

Als Output wurden für jede Applikation Werte der oben genannten Modelle berechnet, welche in der folgenden Tabelle (siehe Tabelle 2-5) dargestellt sind.

2.8 Ergebnis der Schädigungsrechnung

	Unit	Harr_1	Harr_2	Plough	TP_H1	TP_H2	TP_L2	TP_H4	TP_L1	WC	WP_1	WP_2	
Nr.	Duration	[h]	1,99	1,67	2,15	0,92	0,61	0,55	1,23	1,99	1,91	3,17	2,79
18	Events Weighted High Rel. Torque	[1/h]	4852,37	3665,29	33049,52	14837,27	24779,07	3210,24	8026,51	7699,37	568,19	4961,04	1156,00
24	Events High Rel. Torque at Low Speed	[1/h]	810,92	651,24	2532,76	2024,51	3009,98	565,95	1363,54	1289,86	148,77	933,52	384,79
56	Wear Pfp	[1/h]	1,01E+12	7,90E+11	5,14E+12	3,32E+12	5,52E+12	6,67E+11	1,58E+12	1,62E+12	9,21E+10	9,84E+11	1,53E+11
2	TB High Rel. Torque	[%]	1,01	0,58	38,24	6,61	36,71	1,85	4,34	2,19	0,00	0,26	0,01
19	Events High Rel. Torque	[1/h]	525,89	262,14	25883,27	2905,22	19273,16	775,65	1876,56	993,37	0,00	106,85	1,52
55	HCF Pfp	[1/h]	1,00E+28	7,79E+27	3,32E+28	1,09E+29	4,60E+29	2,82E+28	5,65E+28	3,85E+28	4,54E+22	3,61E+27	6,09E+23
9	TB High Torque	[%]	0,48	0,44	0,23	5,20	23,36	1,37	3,21	1,50	0,00	0,17	0,00
13	TB High Power	[%]	0,10	0,03	0,02	0,19	10,58	0,05	0,06	0,18	0,00	0,01	0,00
23	Events High Speed	[1/h]	400,37	39,09	37459,12	179,65	2910,76	480,05	1175,34	39,95	0,00	4,09	0,00
42	Load Cycles Torque Tau 200	[1/h]	0	1,74E-05	5,98E-06	0	1,14E-05	0	1,91E-04	0	0	1,09E-05	0
38	Load Cycles Power Tau 200	[1/h]	0	4,37E-05	2,41E-05	6,92E-06	0	0	2,54E-04	0	0	1,64E-05	0
8	TB Idle	[%]	0	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00
25	Events Idle	[1/h]	0	1,01	3,28	0,00	0,00	0,00	4,16	0,00	0,00	1,50	0,00
57	Wear Camshaft	[1/h]	6501,283619	6541,94	4073,68	5224,02	3483,73	6663,87	7616,87	7483,73	10046,31	7688,57	11768,81

Tabelle 2-5: Output der Schädigungsrechnung

In Tabelle 2-5 ist das Ergebnis der Schädigungsrechnung dargestellt. Dabei wurde für jede Applikation und jedem Schädigungsmodell auf Basis der in Kapitel 2.7 gezeigten Modelltypen ein Schädigungswert berechnet. Diese Werte sind die Grundlage für die weitere Analyse der Messdaten.

2.9 Analyse der Messdaten

Auf die Analyse der Messdaten ist in der vorliegenden Arbeit das Hauptaugenmerk gelegt. Diese Analyse ist dahingehend notwendig, um die Ergebnisse auf Plausibilität zu überprüfen, zu vereinheitlichen und aufzubereiten. In den weiteren Schritten werden die Daten miteinander verglichen, um daraus Aussagen treffen zu können.

Der Ablauf ist wie folgt:

- Normierung
- Rangbewertung
- Korrelationen finden
- Zyklen auswählen
- Generieren von Referenzzyklen

Als Basis für die Analyse dient das Ergebnis aus der Schädigungsrechnung (siehe Tabelle 2-5).

2.9.1 Normierung der Ergebnisse

Die Normierung der Daten ist erforderlich, um diese mit einander vergleichbar zu machen.

Wie schon erwähnt bedient sich dieser erste Schritt der Auswertung an den Daten der Schädigungsrechnung. Dabei wurden die Ergebnisse für das jeweilige Schädigungsmodell auf den maximalen Wert der Schädigung normiert.

Dies wird kurz wie folgt demonstriert:

$$\text{Normierter Wert} = \frac{\text{Schädigungswert der zu betrachtenden Messung}}{\text{Schädigungswert des schädigendsten Messung}} * 100[\%]$$

Gleichung 4: Normierung der Messungen

		Unit	Harr_1	Harr_2	Plough	TP_H1	TP_H2	TP_L2	TP_H4	TP_L1	WC	WP_1	WP_2
Nr.	Duration	[h]	1,99	1,67	2,15	0,92	0,61	0,55	1,23	1,99	1,91	3,17	2,79
18	Events Weighted High Rel. Torque	[1/h]	4852,37	3665,29	33049,52	14337,27	24779,07	3210,24	8026,51	7699,37	568,19	4961,04	1156,00

Schädigungswert des
zu betrachtenden Tests

Schädigungswert des
schädigendsten Tests

Abbildung 2-16: Auszug aus dem Ergebnis der Schädigungsrechnung

Der normierte Wert der Schädigung berechnet sich aus dem Schädigungswert des zu betrachtenden Tests bezogen auf den Schädigungswert des schädigendsten Tests in Prozent.

Der Wert 100 bedeutet die höchste Schädigung bei diesem Test. Der Wert 0 liefert für dieses Modell keine Schädigung.

Führt man diese Prozedur über alle Schädigungsmodelle durch, erhält man die in Tabelle 2-6 dargestellte Matrix.

			Harr_1	Harr_2	Plough	TP_H1	TP_H2	TP_H4	TP_L1	TP_L2	WC	WP_1	WP_2
18	Events Weighted High Rel. Torque	[%]	15	11	100	45	75	24	23	9,7	1,7	15	3,5
24	Events High Rel. Torque at Low Speed	[%]	27	22	84	67	100	45	43	19	4,9	31	13
56	Wear Pfp	[%]	18	14	93	60	100	29	29	12	1,7	18	2,8
2	TB High Rel. Torque	[%]	2,6	1,5	100	17	96	11	5,7	4,8	0	0,7	0
19	Events High Rel. Torque	[%]	2	1	100	11	74	7,3	3,8	3	0	0,4	0
55	HCF Pfp	[%]	2,2	1,7	7,2	24	100	12	8,4	6,1	0	0,8	0
9	TB High Torque	[%]	1,1	0,1	100	0,5	7,8	3,1	0,1	1,3	0	0	0
13	TB High Power	[%]	2	1,9	1	22	100	14	6,4	5,9	0	0,7	0
23	Events High Speed	[%]	0,9	0,3	0,2	1,8	100	0,5	1,7	0,5	0	0,1	0
42	Load Cycles Torque Tau 200	[%]	0	9,1	3,1	0	6	100	0	0	0	5,7	0
38	Load Cycles Power Tau 200	[%]	0	17	9,5	2,7	0	100	0	0	0	6,5	0
8	TB Idle	[%]	0	28	76	0	0	100	0	0	0	39	0
25	Events Idle	[%]	0	24	79	0	0	100	0	0	0	36	0
57	Wear Camshaft	[%]	55	56	35	44	30	65	64	57	85	65	100

Tabelle 2-6: Normierte Auswertung der Simulation

Betrachtet man Tabelle 2-6 genauer, stellt man fest, welche Tests eine hohe Schädigung hervorrufen. Beispielsweise sind diese Pflügen oder schwerer Transport. Im Gegensatz dazu tritt beispielsweise beim Test „WC“ oder „WP_2“ nur sehr geringe Schädigungen auf.

2.9.2 Bewertung der Ergebnisse nach dem Ranking

Basierend auf der im Kapitel 2.9.1 durchgeführten Normierung wird nun eine Rangbewertung durchgeführt.

Hauptgrund der Rangbewertung ist die Vereinfachung der Ergebnisse aus der Normierung. (Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass die Rangbewertung auch auf Basis der unnormierten Ergebnisse dasselbe Ergebnis liefern würde.) Dies bedeutet, dass bei einem beliebigen Schädigungsmodell der am meisten schädigende bzw. der am geringsten schädigende Test/Zyklus direkt ersichtlich ist.

Dies wird nun konkret am Beispiel genauer erklärt:

			Harr_1	Harr_2	Plough	TP_H1	TP_H2	TP_H4	TP_L1	TP_L2	WC	WP_1	WP_2
18	Events Weighted High Rel. Torque	[%]	15	11	100	45	75	24	23	9,7	1,7	15	3,5
			↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
			Harr_1	Harr_2	Plough	TP_H1	TP_H2	TP_H4	TP_L1	TP_L2	WC	WP_1	WP_2
18	Events Weighted High Rel. Torque	[-]	7	8	1	3	2	4	5	9	11	6	10

Abbildung 2-17: Auszug aus Normierung und Ranking

Der Test „Plough“ hat bei diesem Schädigungsmodell die am meisten schädigende Wirkung (100%). Dadurch bekommt dieser den Wert 1. Der Test „TP_H2“ erhält mit 75% Schädigung den Rang 2. Bei den Tests „WP_2“ (3%) und „WC“ (2%) tritt die geringste Schädigung auf, und sie bekommen somit Rang 10 bzw. Rang 11.

Da bei dieser Analyse nur 11 Tests zur Verfügung standen, bewegt sich die Rangbewertung im Bereich von 1 bis 11, wie in Tabelle 2-7 zu erkennen ist.

		Harr_1	Harr_2	Plough	TP_H1	TP_H2	TP_H4	TP_L1	TP_L2	WC	WP_1	WP_2	
18	Events Weighted High Rel. Torque	[-]	7	8	1	3	2	4	5	9	11	6	10
24	Events High Rel. Torque at Low Speed	[-]	7	8	2	3	1	4	5	9	11	6	10
56	Wear Pfp	[-]	6	8	2	3	1	5	4	9	11	7	10
2	TB High Rel. Torque	[-]	7	8	1	3	2	4	5	6	11	9	10
19	Events High Rel. Torque	[-]	7	8	1	3	2	4	5	6	11	9	10
55	HCF Pfp	[-]	7	8	5	2	1	3	4	6	11	9	10
9	TB High Torque	[-]	5	8	1	6	2	3	7	4	11	9	11
13	TB High Power	[-]	6	7	8	2	1	3	4	5	11	9	11
23	Events High Speed	[-]	4	7	8	2	1	5	3	6	11	9	11
42	Load Cycles Torque Tau 200	[-]	8,5	2	5	8,5	3	1	8,5	8,5	8,5	4	8,5
38	Load Cycles Power Tau 200	[-]	8,5	2	3	5	8,5	1	8,5	8,5	8,5	4	8,5
8	TB Idle	[-]	8	4	2	8	8	1	8	8	8	3	8
25	Events Idle	[-]	8	4	2	8	8	1	8	8	8	3	8
57	Wear Camshaft	[-]	8	7	10	9	11	4	5	6	2	3	1

Tabelle 2-7: Ranking

Dabei erkennt man, dass wie schon im Kapitel 2.4 beschrieben, die Operationen „Plough“ oder „TP_H2“ aufgrund der hohen Anzahl der Ränge 1 zu den am meisten schädigenden Anwendungen gehören.

Nach erfolgter Rangbewertung gibt es eine Vielzahl von Ansätzen, um Zusammenhänge zu erkennen, diese abzuschätzen und in weiterer Folge zu bewerten. Allesamt führen zu ähnlichen Lösungen.

Als Beispiel dafür seien:

- Manuelle Selektion
- Korrelation
- Cluster-Analyse

Die **manuelle Selektion** eignet sich bei einer geringen Anzahl von Daten. Dabei werden ohne Analyse, jedoch mit Expertenwissen auf Basis der Schädigungsrechnung die entsprechenden Tests für die Generierung der Referenzzyklen gewählt. Das Expertenwissen kann vom Hersteller oder anderen facheinschlägigen Personen kommen.

Bei der **Cluster-Analyse** kommen komplexe mathematische und statistische Verfahren zum Einsatz. Ähnlich wie bei der Analyse durch Korrelationen werden einzelne Tests in Gruppen, sogenannte Cluster, zusammengefasst. Auf diese Art der Analyse wird in der hier vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher eingegangen.

Die **Analyse durch Korrelationen** bildet den Mittelweg. Dabei werden die einzelnen Tests oder Schädigungsmodelle in Korrelation gebracht. Das Ergebnis liefert eine Matrix, wie es in den nächsten Kapiteln näher erklärt wird.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Auswertung mit Hilfe von Korrelationen, die im folgenden Kapitel näher erklärt wird.

2.9.3 Korrelationen

Korrelationen bieten eine Möglichkeit, große Datenmengen zu analysieren. In der hier vorliegenden Arbeit standen nur 11 Tests zur Verfügung. Bei einer so geringen Anzahl könnte auch die manuelle Selektion zum Einsatz kommen, dennoch wird aufgezeigt, wie man in Zukunft mit größeren Datenmengen umgehen könnte.

Bei der Korrelation werden Tests in Bezug auf ihre Schädigung oder auch Schädigungsmodelle in Bezug auf die Tests miteinander verglichen. Eine genauere Erklärung findet man in den folgenden Kapiteln 2.9.3.1 sowie 2.9.3.2

2.9.3.1 Test vs. Test

Dabei wurden die Korrelationen der einzelnen Tests bezogen auf die Schädigung berechnet. Dies dient grundsätzlich dafür, Tests miteinander zu vergleichen. Bei starker Korrelation zweier oder mehrerer Tests kann angedacht werden, gleichartige Tests zusammen zu fassen.

			Harr_1	Harr_2
18	Events Weighted High Rel. Torque	[-]	7	8
24	Events High Rel. Torque at Low Speed	[-]	7	8
56	Wear Pfp	[-]	6	8
2	TB High Rel. Torque	[-]	7	8
19	Events High Rel. Torque	[-]	7	8
55	HCF Pfp	[-]	7	8
9	TB High Torque	[-]	5	8
13	TB High Power	[-]	6	7
23	Events High Speed	[-]	4	7
42	Load Cycles Torque Tau 200	[-]	8,5	2
38	Load Cycles Power Tau 200	[-]	8,5	2
8	TB Idle	[-]	8	4
25	Events Idle	[-]	8	4
57	Wear Camshaft	[-]	8	7

Abbildung 2-18: Auszug aus einer Korrelation der Tests

Abbildung 2-19: Auszug aus dem Ranking

Der Wert 1 in Tabelle 2-8 zwischen Harr_1 und Harr_1 bedeutet eine ideale Korrelation. Dabei wird der Test aus dem Ranking mit sich selbst verglichen. Ähnliches geschieht beim Wert -0,85 von Harr_1 und Harr_2. Dabei wird Harr_2 mit Harr_1 in Bezug gebracht. Werte um Null zeigen keine Korrelationen, und somit kann in diesem Fall kein Test vernachlässigt, bzw. durch einen anderen Test ersetzt werden.

Wird der Wert der Korrelation negativ, bedeutet dies eine negative bzw. inverse Korrelation.

Test Test	Harr_1	Harr_2	Plough	TP_H1	TP_H2	TP_H4	TP_L1	TP_L2	WC	WP_1	WP_2
Harr_1	1,00	-0,85	-0,15	0,76	0,75	-0,87	0,90	0,81	-0,03	-0,83	0,03
Harr_2	-0,85	1,00	-0,07	-0,69	-0,65	0,86	-0,89	-0,74	-0,08	0,71	-0,21
Plough	-0,15	-0,07	1,00	0,02	0,09	0,12	-0,27	-0,29	-0,60	-0,06	-0,52
TP_H1	0,76	-0,69	0,02	1,00	0,73	-0,72	0,81	0,55	-0,29	-0,82	-0,18
TP_H2	0,75	-0,65	0,09	0,73	1,00	-0,63	0,70	0,52	-0,43	-0,83	-0,34
TP_H4	-0,87	0,86	0,12	-0,72	-0,63	1,00	-0,93	-0,61	-0,18	0,61	-0,29
TP_L1	0,90	-0,89	-0,27	0,81	0,70	-0,93	1,00	0,74	0,14	-0,73	0,25
TP_L2	0,81	-0,74	-0,29	0,55	0,52	-0,61	0,74	1,00	0,21	-0,78	0,24
WC	-0,03	-0,08	-0,60	-0,29	-0,43	-0,18	0,14	0,21	1,00	0,38	0,98
WP_1	-0,83	0,71	-0,06	-0,82	-0,83	0,61	-0,73	-0,78	0,38	1,00	0,31
WP_2	0,03	-0,21	-0,52	-0,18	-0,34	-0,29	0,25	0,24	0,98	0,31	1,00

Tabelle 2-8: Korrelation Test vs. Test

Betrachtet man Tabelle 2-8, stellt man folgende Zusammenhänge fest:

Test WC korreliert beispielsweise sehr stark mit dem Test WP_2. Dies bedeutet, dass einer der beiden vernachlässigt, bzw. durch den anderen Test ersetzt werden könnte; was im Konkreten aber nicht möglich ist, da beide aus unterschiedlichen Bereichen stammen.

Ein weiteres Beispiel ist der Vergleich von TP_H1 mit TP_H2. Dabei besteht ebenfalls eine starke Korrelation untereinander.

Da im vorliegenden Anwendungsbeispiel relativ wenige Messschriebe zur Verfügung standen, kann man hier keinen der Tests wirklich ausschließen.

2.9.3.2 Schädigung vs. Schädigung

Eine weitere Korrelationsmöglichkeit ist das Gegenüberstellen der Schädigungsmodelle, wie in Tabelle 2-9 dargestellt. Basis dafür ist wieder das Ergebnis der Rangbewertung, siehe Tabelle 2-7. Der Wert 1 bedeutet eine ideale Korrelation, -1 eine ideale inverse Korrelation. Diese Möglichkeit bringt die Erkenntnis, eventuell einzelne Schädigungsmodelle vernachlässigen, bzw. durch andere ersetzen zu können.

			Harr_1	Harr_2	Plough	TP_H1	TP_H2	TP_H4	TP_L1	TP_L2	WC	WP_1	WP_2
18	Events Weighted High Rel. Torque	[-]	7	8	1	3	2	4	5	9	11	6	10
24	Events High Rel. Torque at Low Speed	[-]	7	8	2	3	1	4	5	9	11	6	10

Abbildung 2-20: Auszug aus dem Ranking

		18	24
		Events Weighted High Rel. Torque	Events High Rel. Torque at Low Speed
18	Events Weighted High Rel. Torque	1	0,99
24	Events High Rel. Torque at Low Speed	0,99	1

Abbildung 2-21: Auszug aus der Korrelation der Schädigungsmodelle

Im Zuge der Korrelation wird zeilenweise jedes der Schädigungsmodelle im Sinne der Tests miteinander verglichen. Als Ergebnis wird folgende Matrix, siehe Tabelle 2-9, erstellt. Werte nahe 1 liefern wieder eine hohe Korrelation, negative Werte eine inverse Korrelation.

		Schädigung													
		18	24	56	2	19	55	23	9	13	42	38	8	25	57
		Events Weighted High Rel. Torque	Events High Rel. Torque at Low Speed	Wear Pfp	TB High Rel. Torque	Events High Rel. Torque	HCF Pfp	Events High Speed	TB High Torque	TB High Power	Load Cycles Torque Tau 200	Load Cycles Power Tau 200	TB Idle	Events Idle	Wear Camshaft
18	Events Weighted High Rel. Torque	1	0,99	0,97	0,92	0,92	0,83	0,77	0,65	0,63	0,45	0,42	0,35	0,35	-0,73
24	Events High Rel. Torque at Low Speed	0,99	1	0,98	0,91	0,91	0,86	0,76	0,71	0,69	0,46	0,36	0,29	0,29	-0,74
56	Wear Pfp	0,97	0,98	1	0,92	0,92	0,87	0,76	0,73	0,75	0,34	0,25	0,17	0,17	-0,79
2	TB High Rel. Torque	0,92	0,91	0,92	1	1	0,91	0,9	0,75	0,71	0,3	0,27	0,19	0,19	-0,81
19	Events High Rel. Torque	0,92	0,91	0,92	1	1	0,91	0,9	0,75	0,71	0,3	0,27	0,19	0,19	-0,81
55	HCF Pfp	0,83	0,86	0,87	0,91	0,91	1	0,78	0,94	0,89	0,26	0,16	0,01	0,01	-0,71
23	Events High Speed	0,77	0,76	0,76	0,9	0,9	0,78	1	0,67	0,61	0,38	0,23	0,27	0,27	-0,78
9	TB High Torque	0,65	0,71	0,73	0,75	0,75	0,94	0,67	1	0,96	0,21	0,08	-0,11	-0,11	-0,65
13	TB High Power	0,63	0,69	0,75	0,71	0,71	0,89	0,61	0,96	1	0,08	-0,06	-0,24	-0,24	-0,71
42	Load Cycles Torque Tau 200	0,45	0,46	0,34	0,3	0,3	0,26	0,38	0,21	0,08	1	0,72	0,8	0,8	-0,22
38	Load Cycles Power Tau 200	0,42	0,36	0,25	0,27	0,27	0,16	0,23	0,08	-0,06	0,72	1	0,9	0,9	-0,13
8	TB Idle	0,35	0,29	0,17	0,19	0,19	0,01	0,27	-0,11	-0,24	0,8	0,9	1	1	0,01
25	Events Idle	0,35	0,29	0,17	0,19	0,19	0,01	0,27	-0,11	-0,24	0,8	0,9	1	1	0,01
57	Wear Camshaft	-0,73	-0,74	-0,79	-0,81	-0,81	-0,71	-0,78	-0,65	-0,71	-0,22	-0,13	0,01	0,01	1

Tabelle 2-9: Korrelation: Schädigung vs. Schädigung

Im linken oberen Quadranten ist eine starke Korrelation erkennbar. Dies bedeutet, dass unter der Voraussetzung der näheren Betrachtung einzelne Modelle entfallen lassen werden könnten (bzw. durch andere Modelle ersetzt werden könnten), um die Simulationsdauer zu verkürzen oder den Vergleich zu vereinfachen.

Ähnliches gilt für den Bereich im rechten unteren Quadranten. Auch hier besteht eine enge Beziehung der jeweiligen Modelle, und es kann angedacht werden, einen Repräsentanten für diese Belastungsart zu wählen.

2.10 Auswählen der Zyklen

Das Auswählen der Zyklen ist der erste Schritt bei der Generierung von Referenzzyklen.

Referenzzyklen werden aus den jeweils definierten Anwendungen, siehe Tabelle 2-3, zusammengestellt. Dabei ist die Interpretation der gefahrenen Tests von großer Bedeutung. Genauer erklärt wird dies am folgenden Beispiel, der Anwendung der Kreiselegge.

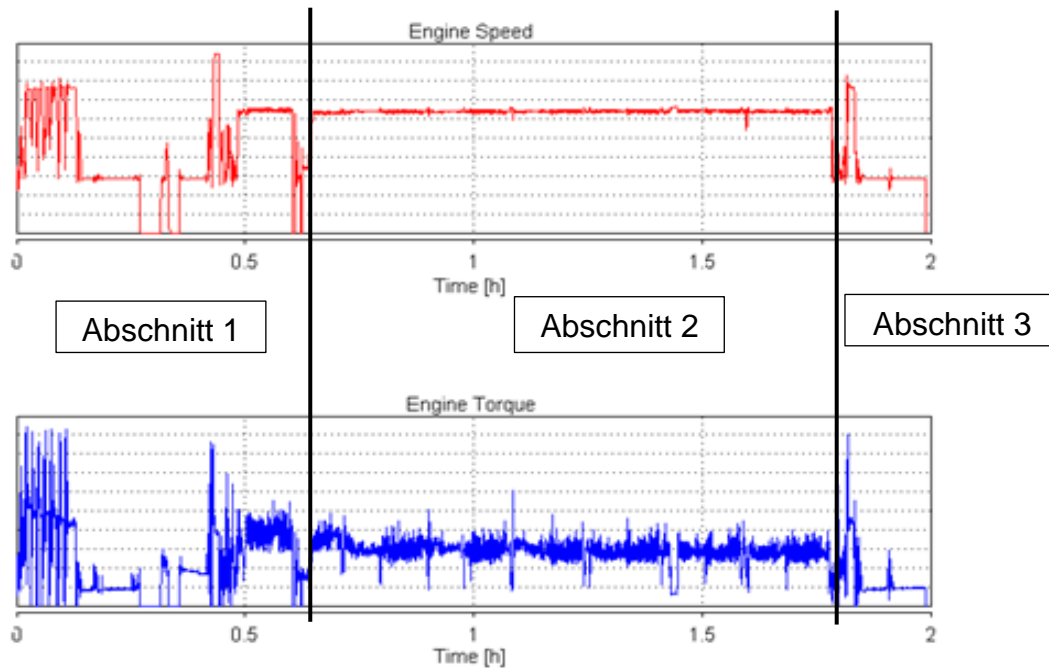


Abbildung 2-22: Interpretation am Beispiel Kreiselegge

Diese Anwendung, siehe Abbildung 2-22, kann in 3 Abschnitte unterteilt werden. Abschnitt 1 dient als Anfahrt und auch Einstellen der Maschine für die Arbeit an sich. Abschnitt 2 beschreibt die eigentliche Anwendung (Kernoperation). Abschnitt 3 kann als Rückfahrt interpretiert werden. Für die Auswahl dieses Zyklus sollte demnach nur der Abschnitt 2 gewählt werden, da nur dieser die eigentliche Anwendung beinhaltet. Anfahrt und Rückfahrt werden in einer anderen Anwendung abgebildet und können hier somit entfallen.

Diese Art der Interpretation wird auch bei allen anderen Tests, die zur Auswahl kommen, durchgeführt.

Ist ein Test im Zuge der Messfahrten zu kurz ausgefallen, kann er einfach beliebig oft zusammengeschaltet werden, um auf die gewünschte Länge der Anwendung zu kommen.

Je nach Anforderung und Korrelationen werden die Zyklen unter Berücksichtigung der vorangegangenen Kapitel für zwei unterschiedliche Referenzzyklen ausgewählt.

Diese zwei Referenzzyklen sind:

- Worst- Case Zyklus
- Best- Case Zyklus

Der Worst- Case Zyklus beinhaltet aus jeder Applikation den am meisten schädigenden Test. Dies wird in weiterer Folge anhand des Mittelwertes über alle Schädigungsränge bewertet. Aus dem Bereich **Bodenbearbeitung** wären dies aufgrund der Unterschiede aus Zugkraftgetrieben und PTO- Getrieben die beiden Tests „*Plough*“ und „*Harr_1*“. Aus dem Bereich **Transport** kommt der Test „*TP_H4*“ zum Einsatz, da bei diesem der Mittelwert, siehe Tabelle 2-7, den geringsten Wert zeigt, und dadurch die meiste Schädigung hervorruft. Aus dem Bereich **Grünland** kristallisiert sich „*WP_1*“ heraus. Aus dem Bereich **Forst** wird der Test „*WC*“ gewählt.

Der Best- Case Zyklus beinhaltet aus jeder Applikation den am geringsten schädigenden Test, dies bedeutet einen hohen Mittelwert über alle Schädigungsränge. Aus dem Bereich **Bodenbearbeitung** wären dies aufgrund der Unterschiede aus Zugkraftgetrieben und PTO- getrieben die beiden Tests „*Plough*“ und „*Harr_2*“. Aus dem Bereich **Transport** kommt der Test „*TP_L2*“ zum Einsatz, da bei diesem der Mittelwert, siehe Tabelle 2-7, den höchsten Wert zeigt, und dadurch die geringste Schädigung hervorruft. Aus dem Bereich **Grünland** kristallisiert sich „*WP_2*“ heraus, und aus dem Bereich **Forst** wird der Test „*WC*“ gewählt.

Zusammenfassend lässt sich die Auswahl der Tests in der folgenden Tabelle, Tabelle 2-10 darstellen:

	Harr_1	Harr_2	Plough	TP_H1	TP_H2	TP_H4	TP_L1	TP_L2	WC	WP_1	WP_2
min	4	2	1	2	1	1	3	4	2	3	1
Anzahl 1er	0	0	4	0	5	4	0	0	0	0	1
Anzahl 11er	4	0	0	3	4	0	4	4	13	0	7
Median	7	7,5	2	3	2	3,5	5	7,5	11	6,5	11
Mittelwert	7,7	6,4	3,6	5,3	4,3	3,1	6,5	7,9	10,4	6,4	9,9
Standardabweichung	2,4	2,3	3,1	3,6	4,4	1,5	3,1	2,5	2,4	2,6	2,6

Tabelle 2-10: Auswahl der Zyklen

Legende:	
	... Worst- Case Zyklus
	... Best- Case Zyklus
	... von beiden Zyklen gewählt

2.11 Konsequenzen der Zyklusauswahl

Durch das Bearbeiten der Einzelzyklen, konkret das Herauslösen der Kernoperationen, kann es unter Umständen zu Verschiebungen der Schädigungswirkungen der bearbeiteten Zyklen kommen.

In weiterer Folge wird der Prozess zur Erstellung von den Referenzzyklen fortgeführt, ohne näher auf diese mögliche Verschiebung einzugehen.

Eine weitergehende Betrachtung eventueller Effekte einer Bearbeitung der Einzelzyklen wird in Kapitel 2.14 vorgenommen.

2.12 Generieren der Referenzzyklen

Ziel dieser Arbeit ist das Abbilden des Referenzzyklus eines ganzen Arbeitstages. Darum wurde als Zykluslänge 8 Stunden gewählt.

Referenzzyklen dienen in erster Linie zur Bewertung des Validierungsprogrammes, sie können aber auch am Prüfstand gefahren werden. Deshalb hat sich eine Länge von 6 bis 8 Stunden als sinnvoll erwiesen.

Im konkreten Fall sollte die Fahrbarkeit gegeben sein. Das bedeutet im Speziellen, dass die Sprünge von Drehzahl oder Drehmoment des jeweiligen Zyklus nicht höher sind als die Maxima in der Prüfstandspezifikation.

Ein weiteres Hilfsmittel ist die Trennung der einzelnen Abschnitte durch Leerlaufeinheiten. Dadurch entsteht zwar ein synthetischer Zyklus, aber aufgrund seiner „echten“ Teilabschnitte wird dieser realitätsnahe und zudem fahrbar.

Unter Berücksichtigung der Auswahl der Tests in Kapitel 2.10 werden nun die einzelnen Tests zu einem Referenzzyklus zusammengefügt. Dabei trennen sich die einzelnen Tests durch Leerlaufeinheiten.

2.12.1 Worst- Case Zyklus

Der Worst- Case Zyklus stellt den am meisten schädigenden Kunden auf Basis der verfügbaren Messdaten dar. Darum wurden die jeweils schädigendsten Tests gewählt.

Wie schon in Kapitel 2.10 erwähnt, wurden folgende Tests aus den jeweiligen Bereichen, siehe Tabelle 2-3, ausgewählt.

- **15% Grünland:** „WP_1“
- **20% Bodenbearbeitung:** „Plough“ und „Harr_1“
- **35% Transport:** „TP_H4“
- **10% Forst:** „WC“
- **20% Leerlauf**

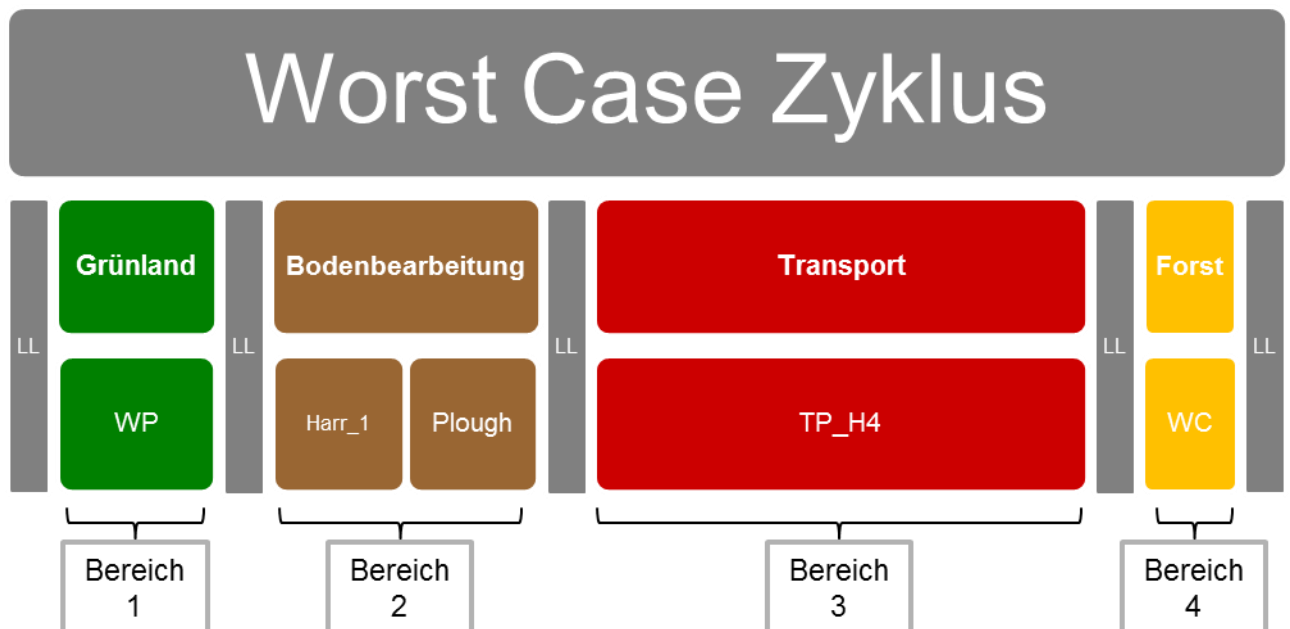


Abbildung 2-23: Schema Worst- Case Zyklus

Der Zyklus startet mit einer Leerlaufphase.

Der Bereich 1 (Grünland) stammt zur Gänze aus dem Test WP_1. Danach folgt eine Leerlaufphase.

Der Bereich 2 (Bodenbearbeitung) teilt sich laut Expertenwissen vom Hersteller sowie der Aufzeichnungen von Messfahrten über ein ganzes Jahr verteilt 50:50 (zugkraftgetrieben bzw. PTO- getrieben) in Plough und Harr_1 auf. Nach der Leerlaufphase beginnt Bereich 3.

Der Bereich 3 (Transport) setzt sich aus TP_H4 zusammen. Nach einer Leerlaufphase beginnt Bereich 4.

Der Bereich 4 (Forst) beinhaltet den Test WC. Den Abschluss macht wieder eine Leerlaufphase.

Der so entstandene Zyklus ist zwar prinzipiell synthetisch generiert, siehe Abbildung 2-24, hat aber aufgrund der realen Teilabschnitte durchaus realitätsnahen Charakter.

Die Dauer des Referenzzyklus beträgt 8 Stunden.

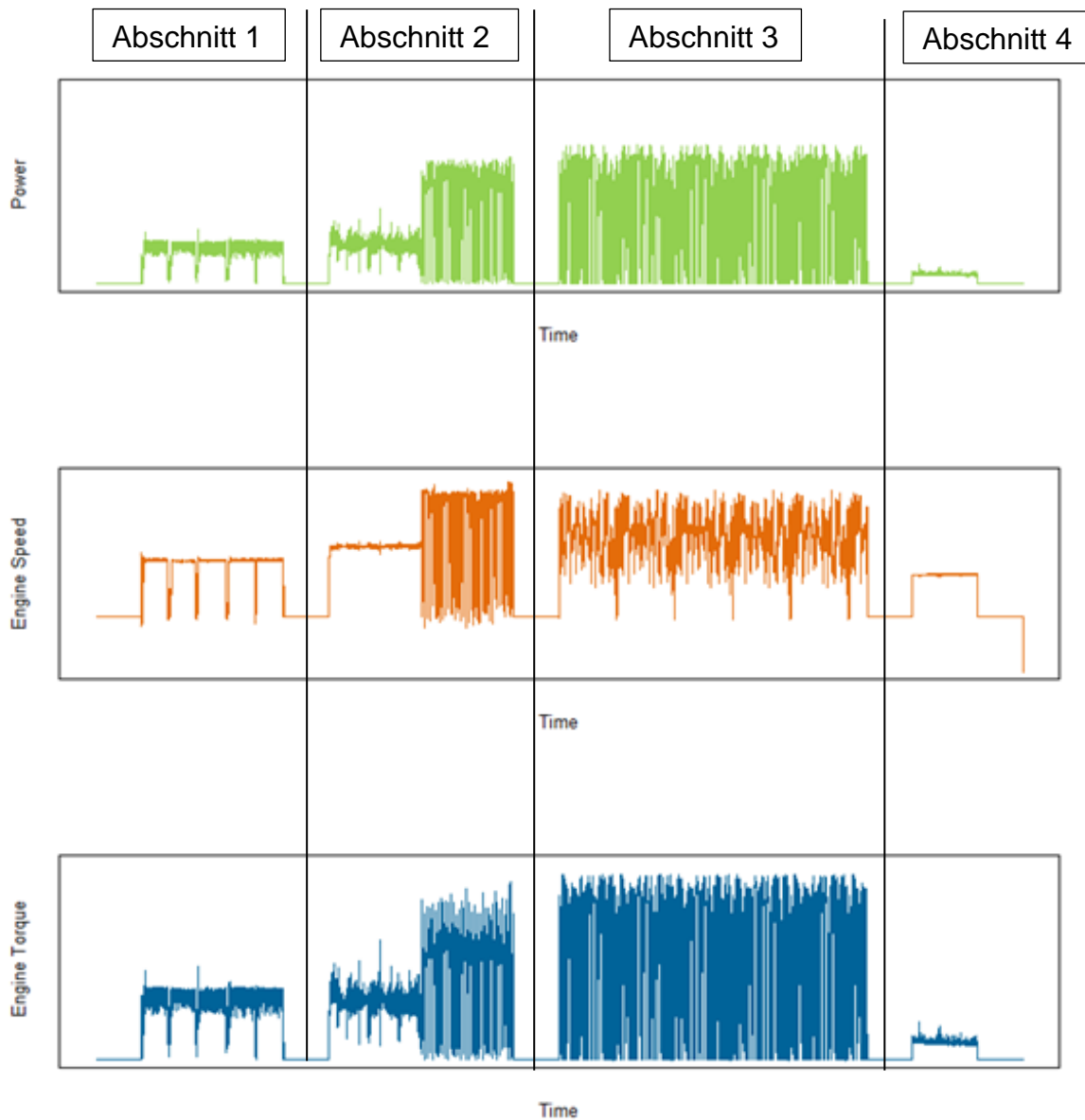


Abbildung 2-24: Aufbau Worst- Case Zyklus

In Abbildung 2-24 ist nun der generierte Worst- Case Zyklus dargestellt. Die Auflösung beträgt 1Hz; somit ist der Zyklus am Prüfstand fahrbar.

Die jeweiligen Teilabschnitte aus den Testfahrten wurden so gewählt, dass nur die reine Anwendung im Mittelpunkt steht.

Der Abschnitt 1 zeigt wie erwähnt den Bereich Grünland. Diese ist sehr stark PTO-abhängig, erkennbar anhand der konstanten Drehzahl. Die Drehzahlsprünge zwischen ca. 1500 und 750 U/min kommen bei Wendemanövern zustande.

Der Abschnitt 2, Bereich Bodenbearbeitung, wurde zu jeweils gleichen Anteilen in Kreiselegge und Pflügen unterteilt. Die Anwendung Kreiselegge ist wieder sehr stark PTO getrieben, erkennbar an der konstanten Drehzahl des Motors. Pflügen ist eine reine Zugoperation, daher die wechselnde Drehzahl und das wechselnde Drehmoment.

Im Abschnitt 3 ist der Bereich Transport abgebildet. Der Transport ist ebenfalls eine reine Zugoperation, erkennbar an der wechselnden Drehzahl sowie am wechselnden Drehmoment.

Im Abschnitt 4 ist der Bereich Forst abgebildet. Dieser ist wiederum durch PTO getrieben, erkennbar an der konstanten Drehzahl.

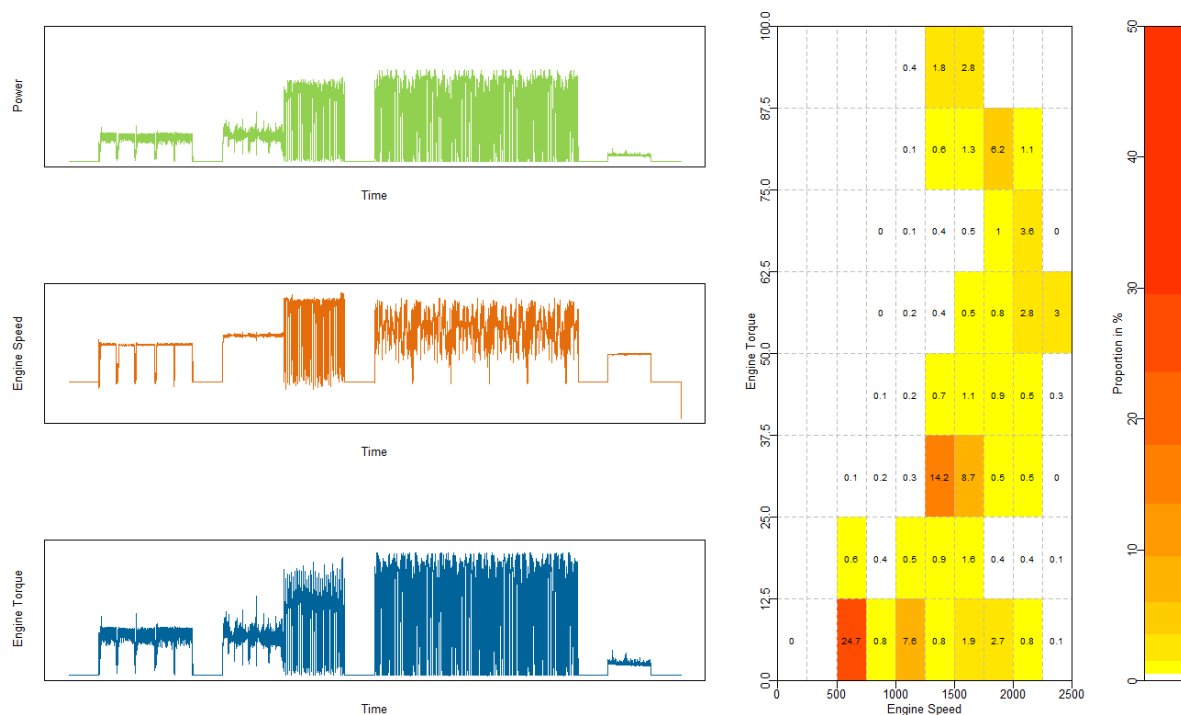


Abbildung 2-25: Worst- Case Zyklus

Die Aneinanderreihung der einzelnen Abschnitte wurde im vorliegenden Fall willkürlich gewählt. Die Reihenfolge kann sehr wohl eine Auswirkung auf die Schädigung haben; dies wird an dieser Stelle nicht näher erörtert.

2.12.2 Best- Case Zyklus

Der Best- Case Zyklus stellt den am geringsten schädigenden Kunden auf Basis der verfügbaren Messdaten dar. Dadurch wird der Referenzzyklus dieses Typs weniger schädigend ausfallen.

Für den Best- Case Zyklus wurden folgende Tests aus den Bereichen, siehe Tabelle 2-3, ausgewählt

- **15% Grünland:** „WP_2“
- **20% Bodenbearbeitung:** „Harr_2“ und „Plough“
- **35% Transport:** „TP_L2“
- **10% Forst:** „WC“
- **20% Leerlauf**

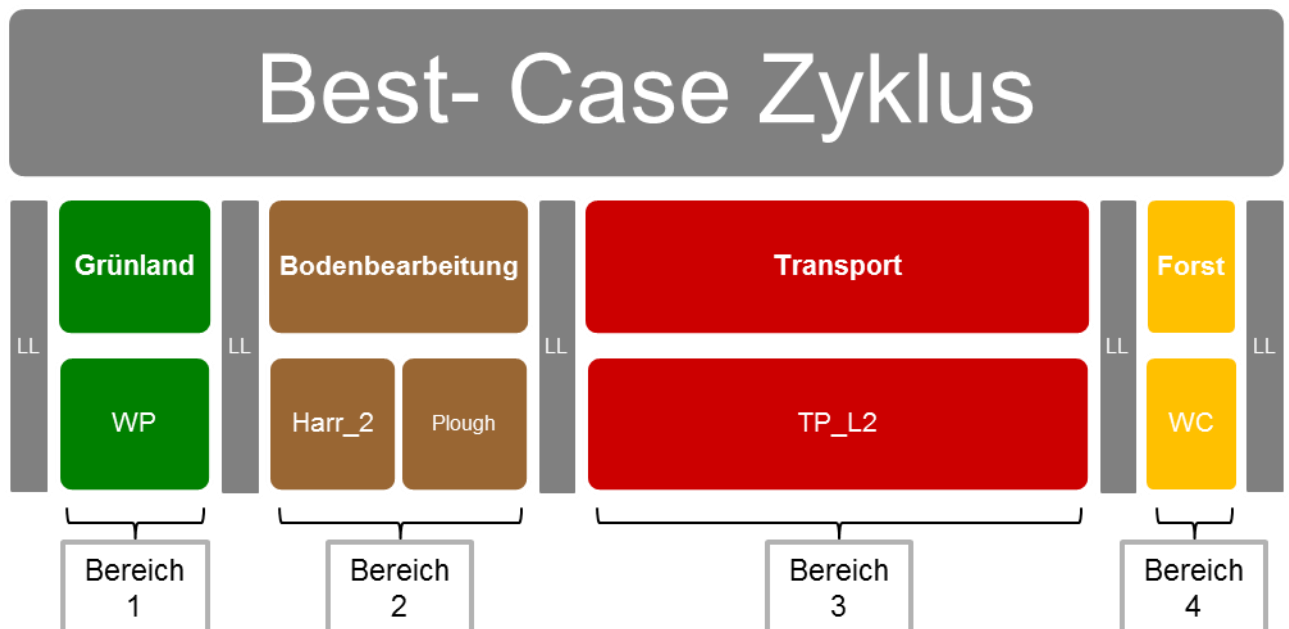


Abbildung 2-26: Schema Best- Case Zyklus

Der Best- Case Zyklus beginnt und endet mit einer Leerlaufphase. Zwischen den Bereichen befinden sich ebenfalls Zeitanteile mit Leerlauf.

Der Bereich 1 (Grünland) besteht aus dem Test WP_2.

Der Bereich 2 (Bodenbearbeitung) teilt sich jeweils wie oben (siehe Kapitel 2.12.1) zur Hälfte in Plough und zur Hälfte in Harr_2 auf.

Der Bereich 3 (Transport) besteht aus dem Test TP_L2.

Der Bereich 4 (Forst) beinhaltet den Test WC.

Der so entstandene Best- Case Zyklus ist ebenfalls synthetisch generiert, siehe Abbildung 2-27. Dennoch hat dieser aufgrund der realen Teilabschnitte durchaus realitätsnahen Charakter.

Die Dauer des Referenzzyklus beträgt wiederum 8 Stunden.

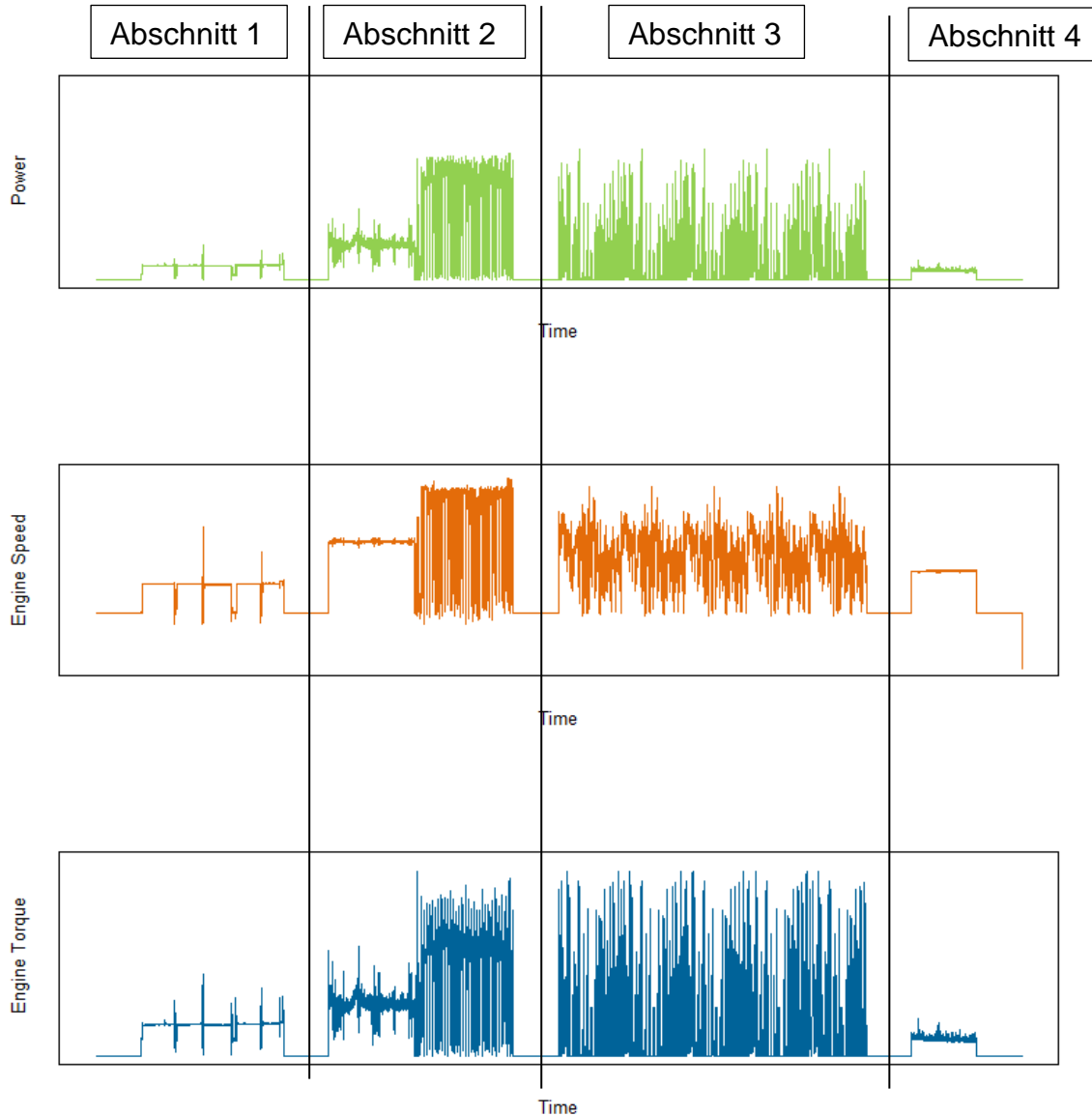


Abbildung 2-27: Aufbau Best- Case Zyklus

In Abbildung 2-27 ist nun der generierte Best- Case Zyklus dargestellt. Die Auflösung beträgt wiederum 1Hz, sodass eine Fahrbarkeit am Prüfstand gegeben ist.

Auch bei diesem Zyklus wurden die jeweiligen Teilabschnitte aus den Testfahrten so gewählt, dass nur die reine Kernoperation im Mittelpunkt steht.

Der Abschnitt 1 zeigt den Bereich Grünland. Dieser ist sehr stark PTO- abhängig, erkennbar anhand der konstanten Drehzahl. Die Drehzahlsprünge zwischen ca. 1000 und 750 U/min kommen beim Wendemanöver zustande.

Der Abschnitt 2, Bereich Bodenbearbeitung, wurde zum jeweils gleichen Anteil in Kreiselegge und Pflügen unterteilt. Die Anwendung Kreiselegge ist wieder sehr stark PTO getrieben, erkennbar an der konstanten Drehzahl des Motors. Pflügen ist eine reine Zugoperation, daher die wechselnde Drehzahl und wechselndes Drehmoment.

Im Abschnitt 3 ist der Bereich Transport abgebildet. Der Transport ist ebenfalls eine reine Zugoperation, erkennbar an der wechselnden Drehzahl sowie am wechselnden Drehmoment.

Im Abschnitt 4 ist der Bereich Forst abgebildet. Dieser ist wiederum durch PTO getrieben, erkennbar an der konstanten Drehzahl.

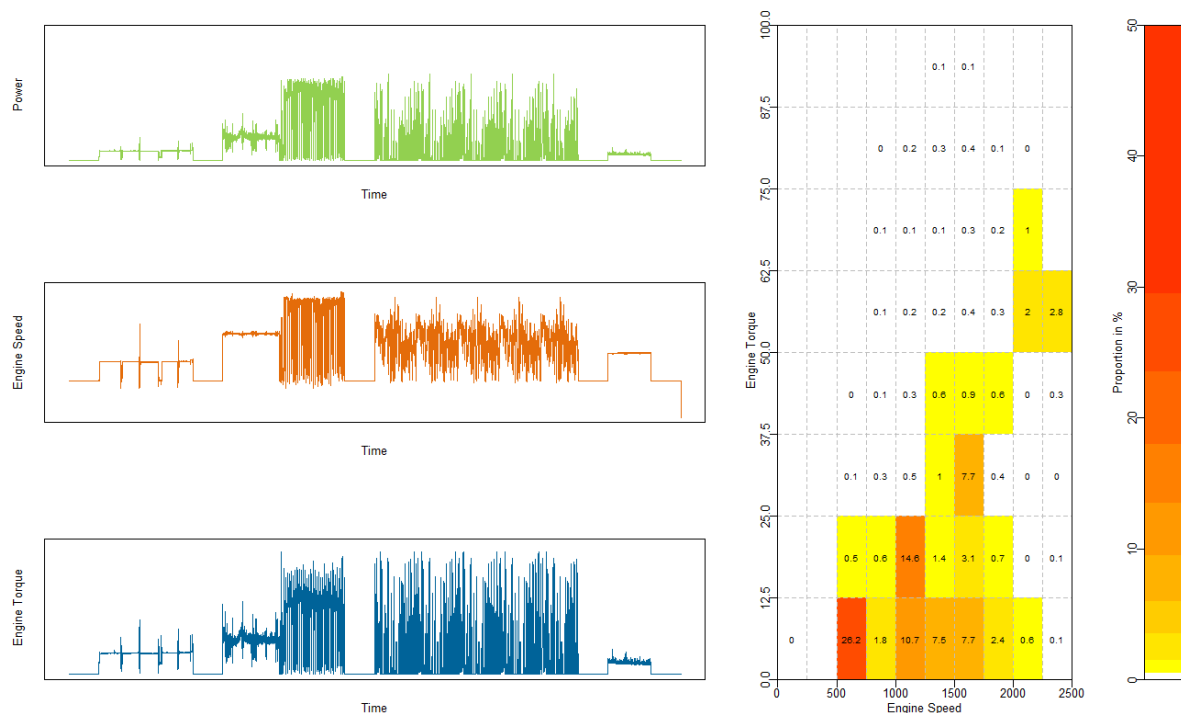


Abbildung 2-28: Best- Case Zyklus

Die Aneinanderreihung der einzelnen Abschnitte wurde wiederum willkürlich gewählt; der Zyklus kann natürlich auch in einer anderen Reihenfolge zusammengesetzt werden.

2.13 Vergleich der beiden Referenzzyklen

Beide gewählten Referenzzyklen haben dieselbe Länge und können somit gut miteinander verglichen werden.

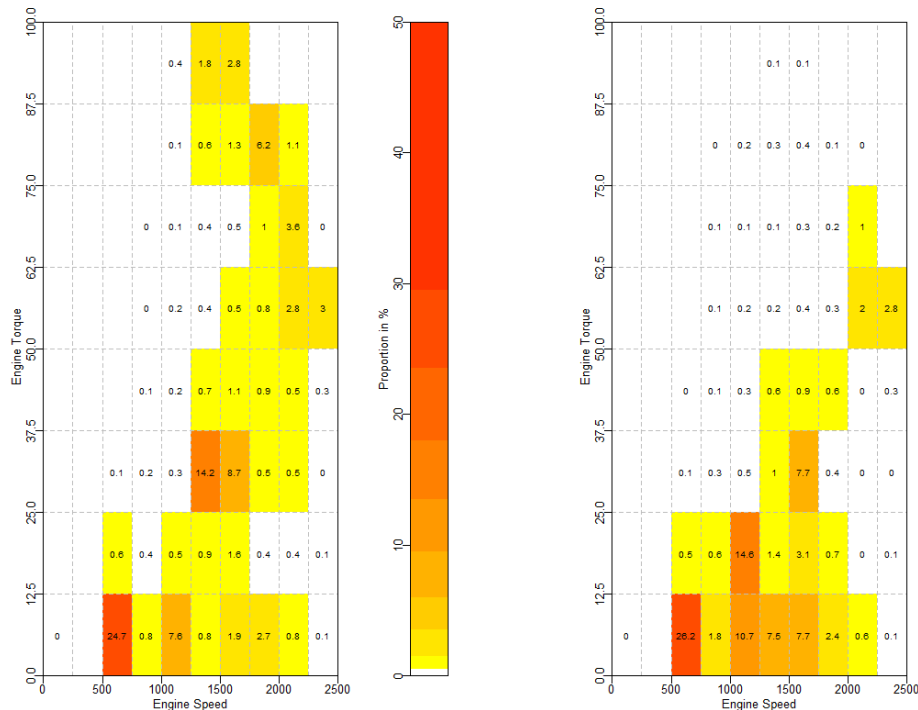


Abbildung 2-29: Kennfeld – Worst- Case Zyklus (links) vs. Best- Case Zyklus (rechts)

Abbildung 2-29 zeigt den Vergleich der Kennfelder der jeweiligen Zyklen. Dabei ist die höhere Belastung durch den Worst- Case Zyklus, welche in erster Linie durch Transportanwendungen entsteht, anhand der höheren Zeitanteile im oberen Bereich deutlich zu erkennen.

Ein weiterer Unterschied der Zeitanteile ist bei der Drehzahl von 1250 U/min bis 1500 U/min (Worst- Case) bzw. 1000 U/min bis 1250 U/min erkennbar. Dabei handelt es sich um die PTO Anwendungen, genauer gesagt aus dem Bereich Bodenbearbeitung mit der Applikation Kreiselegge. Die Drehzahlbereiche sind aufgrund der PTO Anwendung zwar ähnlich, Unterschiede werden aber in der Drehmomentanforderung deutlich. Der Worst- Case Zyklus hat demnach eine höhere Drehmomentanforderung als der Best- Case Zyklus.

Weiters sind in beiden Kennfeldern der Zyklen hohe Zeitanteile im Bereich Leerlauf entsprechend der Planung zu sehen.

Um nun einen Vergleich der beiden Referenzzyklen bezüglich ihres Schädigungspotentials zu erhalten, wurde die bereits in Kapitel 2.7 durchgeführte Schädigungsrechnung nochmals auf diese angewandt. Das Ergebnis ist ein Schädigungswert pro Modell für den Best- beziehungsweise Worst- Case Zyklus.

Zusätzlich wurde für jedes Schädigungsmodell der jeweils minimale, maximale und mittlere Schädigungswert über alle Messfahrten ermittelt. Dabei entsprechen 0% die minimale Schädigung jedes Modelles, beziehungsweise 100% die maximale Schädigung des jeweiligen Modelles in Abhängigkeit des Tests. Die Differenz der Maxima und Minima der Schädigungswerte stellen somit das Streuband für das jeweilige Schädigungsmodell dar.

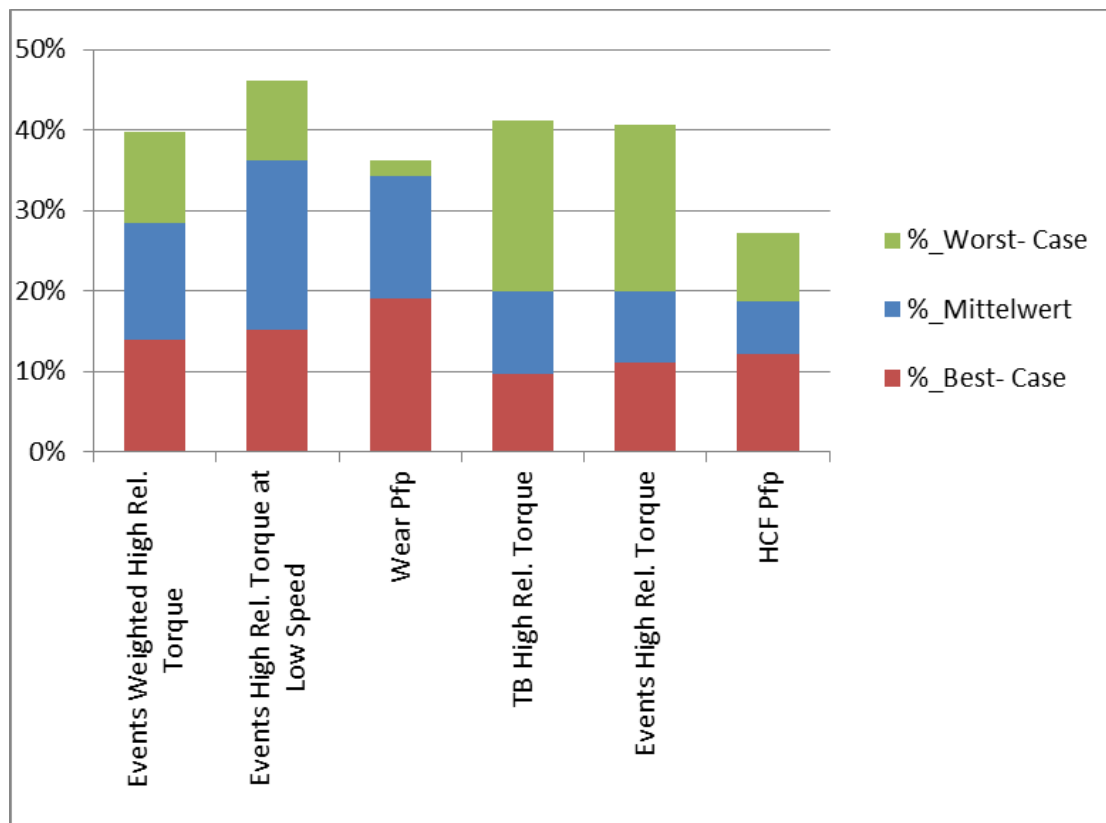


Abbildung 2-30: Auszug aus Schädigungsrechnung im Vergleich der beiden Zyklen

In Abbildung 2-30 ist nun ein Auszug aus der Schädigungsrechnung gezeigt.

Blau dargestellt ist der Mittelwert der Schädigungswerte aus den in Kapitel 2.7 dargestellten Modellen bezogen auf dieses Streuband. Die roten und grünen Balken zeigen Best- und Worst- Case Zyklus wiederum bezogen auf das beschriebene Streuband.

Beim Modell Events Weighted High Rel. Torque liegt der Mittelwert der Schädigungsrechnung aus allen Messfahrten bei etwa 28%. Der Worst- Case Zyklus liegt mit knapp 40% über dem des Mittelwertes, der Best- Case Zyklus mit etwa 13% unter dem des Mittelwertes.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Worst- Case Zyklus tendenziell bei jedem Schädigungsmodell über dem Mittelwert der Einzeltests liegt. Der Worst- Case Zyklus besteht wie in Abbildung 2–27 erklärt aus Teilabschnitten, die wiederum durch Leerlaufelemente getrennt wurden. Aus diesem Grund kann die nur in einem

geringen Ausmaß entstandene Überhöhung bei den ausgewählten Schädigungsmodellen erklärt werden.

Der Best- Case Zyklus liegt wie erwartet unterhalb der Mittelwerte. Dadurch ergibt sich, wie eingangs definiert, ein Referenzzyklus mit geringerem Schädigungspotential.

2.14 Evaluierung der bearbeiteten Einzeltests

Wie in Kapitel 2.10 bereits erwähnt, wurden die Kernelemente der jeweils ausgewählten Zyklen zur Erstellung der beiden Referenzzyklen herausgelöst. Dabei wurde eine mögliche Verschiebung der schädigenden Wirkung aufgrund des HerauslöSENS der Kernelemente vernachlässigt.

Normalerweise müssten diese ausgewählten Kernelemente wieder den Prozess der Schädigungsrechnung bis hin zur Bildung der Korrelationen iterativ durchlaufen. Dies wird nun auch durchgeführt. Das Ergebnis der Schädigungsrechnung wird, wie in Kapitel 2.9.1 normiert und weiter wie in Kapitel 2.9.2 gezeigt, mit einem Ranking versehen. Das Ergebnis ist in Tabelle 2-11 dargestellt. Die Tabelle ist zeilenweise aufgebaut. Das bedeutet, dass sich das Ranking der einzelnen Zyklen auf jeweils ein Schädigungsmodell bezieht.

		Harr_1_kurz	Harr_2_kurz	Plough_kurz	TP_H1	TP_H2_kurz	TP_H4	TP_L1	TP_L2	WC_kurz	WP_1_kurz	WP_2_kurz	
18	Events Weighted High Rel. Torque	[-]	7	8	1	3	2	4	5	9	11	6	10
24	Events High Rel. Torque at Low Speed	[-]	7	8	2	3	1	4	5	9	11	6	10
56	Wear Pfp	[-]	4	5	1	3	2	6	7	8	10	9	11
2	TB High Rel. Torque	[-]	9,5	7	2	3	1	4	5	6	9,5	9,5	9,5
19	Events High Rel. Torque	[-]	9,5	7	1	3	2	4	5	6	9,5	9,5	9,5
55	HCF Pfp	[-]	6	7	1	3	2	4	5	8	10	9	11
9	TB High Torque	[-]	9	9	1	5	2	3	6	4	9	9	9
13	TB High Power	[-]	9,5	7	6	2	1	3	4	5	9,5	9,5	9,5
23	Events High Speed	[-]	9	9	6	2	1	4	3	5	9	9	9
42	Load Cycles Torque Tau 200	[-]	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	1	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
38	Load Cycles Power Tau 200	[-]	7	7	7	2	7	1	7	7	7	7	7
8	TB Idle	[-]	7	7	1	7	7	2	7	7	7	7	7
25	Events Idle	[-]	7	7	1	7	7	2	7	7	7	7	7
57	Wear Camshaft	[-]	9	8	10	7	11	3	5	6	2	4	1

Tabelle 2-11: Ranking der herausgelösten Kernoperationen

Es ist klar zu erkennen, dass gewisse Schädigungsmodelle bei einigen Zyklen kein Ergebnis liefern, da diese Kernoperationen bei PTO getriebenen Tests, im Speziellen auf die Drehzahl bezogen, nur schwach bis gar nicht transient ablaufen.

Des Weiteren fielen auch zum Teil die Leerlaufelemente weg, was wiederum eine Veränderung bei den Schädigungsmodellen TB Idle (Nr. 8) und Events Idle (Nr. 25) ergibt.

In Tabelle 2-12 ist nun dieser Vergleich der Rangbewertungen dargestellt. Auf der linken Seite ist das Ergebnis der herausgelösten Kernelemente dargestellt, auf der rechten Seite das Ergebnis der Schädigungsrechnungen von den originalen Messfahrten.

		Harr_1_kurz	Harr_2_kurz	Plough_kurz	TP_H1	TP_H2_kurz	TP_H4	TP_L1	TP_L2	WC_kurz	WP_1_kurz	WP_2_kurz	Harr_1	Harr_2	Plough	TP_H1	TP_H2	TP_H4	TP_L1	TP_L2	WC	WP_1	WP_2	
18	Events Weighted High Rel. Torque	[-]	7	8	1	3	2	4	5	9	11	6	10	7	8	1	3	2	4	5	9	11	6	10
24	Events High Rel. Torque at Low Speed	[-]	7	8	2	3	1	4	5	9	11	6	10	7	8	2	3	1	4	5	9	11	6	10
56	Wear Pfp	[-]	4	5	1	3	2	6	7	8	10	9	11	6	8	2	3	1	5	4	9	11	7	10
2	TB High Rel. Torque	[-]	9,5	7	2	3	1	4	5	6	9,5	9,5	9,5	7	8	1	3	2	4	5	6	11	9	10
19	Events High Rel. Torque	[-]	9,5	7	1	3	2	4	5	6	9,5	9,5	9,5	7	8	1	3	2	4	5	6	11	9	10
55	HCF Pfp	[-]	6	7	1	3	2	4	5	8	10	9	11	7	8	5	2	1	3	4	6	11	9	10
9	TB High Torque	[-]	9	9	1	5	2	3	6	4	9	9	9	5	8	1	6	2	3	7	4	11	9	11
13	TB High Power	[-]	9,5	7	6	2	1	3	4	5	9,5	9,5	9,5	6	7	8	2	1	3	4	5	11	9	11
23	Events High Speed	[-]	9	9	6	2	1	4	3	5	9	9	9	4	7	8	2	1	5	3	6	11	9	11
42	Load Cycles Torque Tau 200	[-]	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	1	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	8,5	2	5	8,5	3	1	8,5	8,5	8,5	4	8,5
38	Load Cycles Power Tau 200	[-]	7	7	7	2	7	1	7	7	7	7	7	8,5	2	3	5	8,5	1	8,5	8,5	8,5	4	8,5
8	TB Idle	[-]	7	7	1	7	7	2	7	7	7	7	7	8	4	2	8	8	1	8	8	8	3	8
25	Events Idle	[-]	7	7	1	7	7	2	7	7	7	7	7	8	4	2	8	8	1	8	8	8	3	8
57	Wear Camshaft	[-]	9	8	10	7	11	3	5	6	2	4	1	8	7	10	9	11	4	5	6	2	3	1

Tabelle 2-12: Vergleich des Rankings der Kernoperationen (links) und der originalen Tests (rechts)

Für die Auswahl zur Generierung der Referenzzyklen wurden wie in Kapitel 2.10 dargestellt, die stärksten Tests für den Worst- Case Zyklus beziehungsweise die schwächsten Tests des Best- Case Zyklus herangezogen. Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wurden die Mittelwerte dieser Rangbewertung gebildet.

In Tabelle 2-13 ist der Vergleich der Mittelwerte über die Rangwertung der einzelnen Tests dargestellt.

	Harr_1	Harr_2	Plough	TP_H1	TP_H2	TP_H4	TP_L1	TP_L2	WC	WP_1	WP_2
Mittelwert der originalen Messarten	6,9	6,4	3,6	4,7	3,7	3,1	5,7	7,1	9,5	6,4	9,0
Mittelwert der Kernoperationen	7,6	7,3	3,3	4,0	3,8	3,2	5,5	6,7	8,4	7,7	8,4

Tabelle 2-13: Vergleich der Rangbewertung aufgrund ihrer Mittelwerte

Dabei kam man zu dem Ergebnis, dass in diesem Fall das Herauslösen der Kernelemente keinen nennenswerten Einfluss hinsichtlich des Mittelwertes ergab. Aus allen Bereichen, sei es Grünland, Bodenbearbeitung, Transport oder Forst,

bleiben die höchsten beziehungsweise geringsten Mittelwerte bei den Kernoperationen gleich.

Aus diesem Grund hatte der iterative Prozess bei diesem Beispiel keinen Einfluss. Für künftige Projekte wird dennoch empfohlen, das Herauslösen der Kernoperationen der einzelnen Anwendungen schon zu Beginn durchzuführen, um möglichst rasch zu einem plausiblen und nachvollziehbaren Ergebnis zu kommen.

2.15 Flussdiagramm der Prozesskette zur Generierung von Referenzzyklen

Um die in Kapitel 2ff. aufgezeigte Vorgehensweise vereinfacht darzustellen, ist in Abbildung 2-31 das Flussdiagramm als eine Art Arbeitsanweisung zur Gestaltung von Referenzzyklen abgebildet.

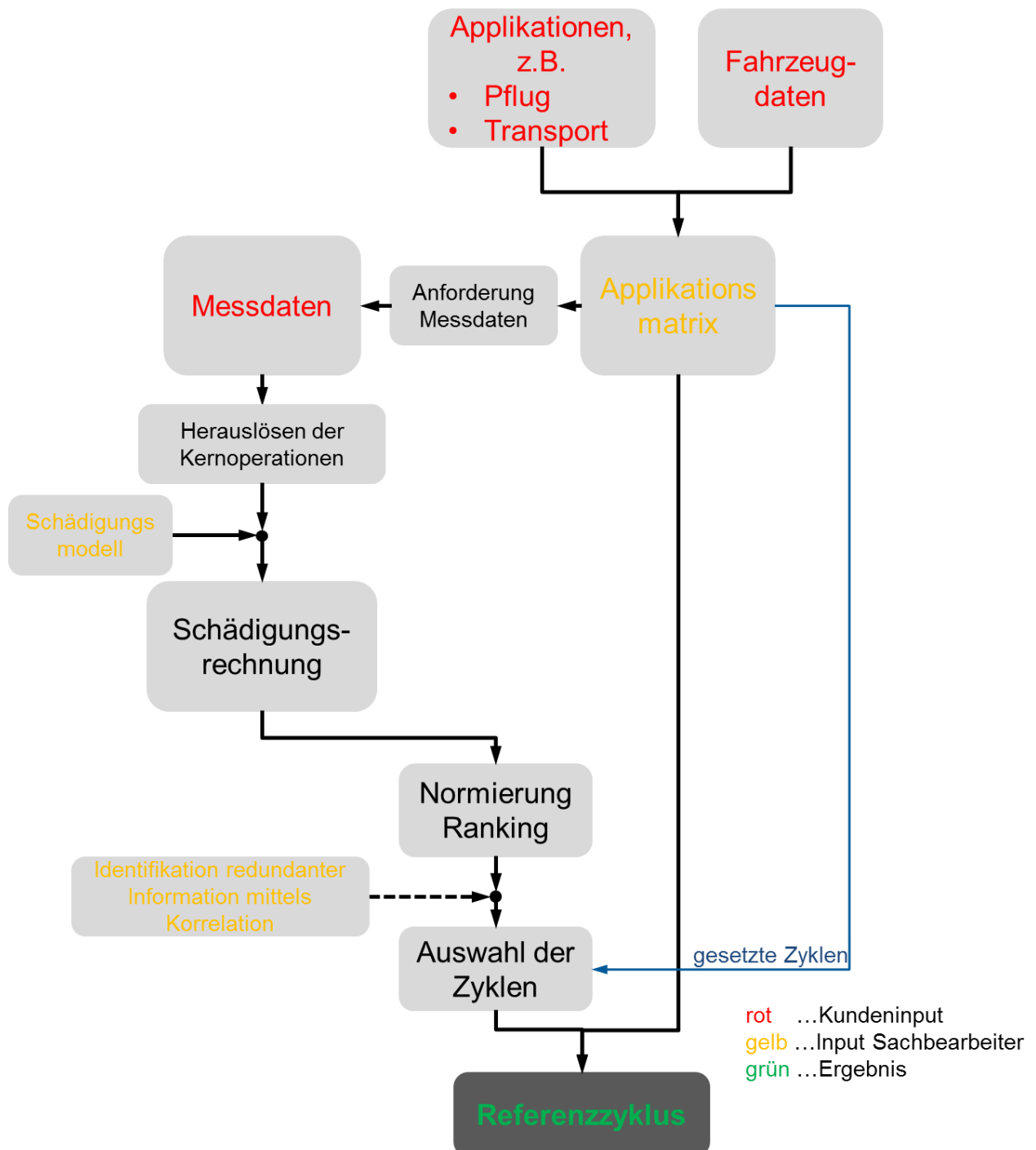


Abbildung 2-31: Vorgehensweise zur Gestaltung von Referenzzyklen

Zur Erstellung von Referenzzyklen werden Informationen vom Kunden über das zu betrachtende Fahrzeug benötigt. Diese Inputs erstrecken sich von Einsatzort über Einsatzzweck bis hin zu konkreten Fahrzeugdaten wie zum Beispiel Motordaten (Leistung, Hubraum, Art der Abgasnachbehandlung, etc.) des zu betrachtenden Fahrzeuges. Des Weiteren sind Messfahrten der einzelnen Applikationen, sofern diese vorhanden sind, als Input für die Schädigungsrechnung erforderlich. Fehlende Messfahrten aus der Applikationsmatrix müssen zusätzlich erarbeitet werden. Diese Messdaten sollten in zeitaufgelöster Form vorliegen. Aus diesen Messdaten werden in weiterer Folge die Kernoperationen der einzelnen Anwendungen herausgelöst, wie in Kapitel 2.10 gezeigt wurde.

Mit diesen modifizierten Messdaten und unter Zuhilfenahme der Schädigungsmodelle geht der Pfad weiter zur Schädigungsrechnung. Dabei werden die zuvor definierten Schädigungsmodelle auf die Messdaten angewandt, siehe Kapitel 2.7. Danach wird empfohlen, das Ergebnis der Schädigungsrechnung zu normieren und eine Bewertung des Ranges durchzuführen.

Aus dieser Rangbewertung können in weiterer Folge Korrelationen gebildet werden, wie in Kapitel 2.9.3 dargestellt. Diese Korrelationen geben Aufschluss darüber, ob einzelne Messfahrten eine gewisse Ähnlichkeit mit anderen Messfahrten aufweisen. Dabei sollte der Link zur Applikationsmatrix, siehe Abbildung 1-21, stets im Auge behalten werden.

Aus diesen Informationen können nun die einzelnen Zyklen zur Erstellung eines Referenzzyklus ausgewählt werden. Dabei ist zu beachten, dass eventuelle Messfahrten ein sogenanntes „Must-Have“ sind und als gesetzt betrachtet werden müssen.

Durch Aneinanderreihung der einzelnen ausgewählten Zyklen erhält man schlussendlich als Ergebnis den geforderten Referenzzyklus, wie in Kapitel 2.12ff. aufgezeigt wurde.

C. Schluss

1. Zusammenfassung

Im Zuge der Validierung technischer Systeme ist ein Vergleich zur im realen Betrieb potentiell auftretenden Schädigung unabdingbar. Um diesbezüglich Testprogramme sinnvoll bewerten zu können, wird auf sogenannte Referenzzyklen zurückgegriffen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine Methodik aufzuzeigen, mit der man effizient aus Sicht der Schädigung zu Referenzzyklen von landwirtschaftlichen Zugmaschinen, im Konkreten von Traktoren, kommt. Dabei lag die Herausforderung darin, die Vielfalt der Einsatzbedingungen bei gleichzeitig geringer Datenlage mit gezielten Maßnahmen so zu bearbeiten, dass am Ende mögliche Referenzzyklen abgeleitet werden können, die diese Vielfalt geeignet abbilden. Ein Flussdiagramm, welches den Ablauf zur Generierung dieser Referenzzyklen an sich beschreibt, bildete den Abschluss.

Im Konkreten standen Messdaten von einem realen Fahrzeug zu Verfügung. Da in diesen Daten nur eine kleine Auswahl der tatsächlichen Einsatzmöglichkeiten (wie zum Beispiel Anwendungen aus den Bereichen Grünland, Bodenbearbeitung, Transport etc.) solcher Fahrzeuge verfügbar waren, konnten nur diese Einsätze untereinander verglichen werden (zum Beispiel die Ergebnisse aus Korrelationen der einzelnen Messfahrten). Dennoch zeigt die vorliegende Arbeit einen möglichen Weg auf, der als Leitfaden für zukünftige Projekte dienen kann. So zeigten beispielsweise die Korrelationen der einzelnen Schädigungsmodelle das Potenzial für eine mögliche Reduktion der Anzahl auf. Es wurde auch aufgezeigt, dass gewisse Kernoperationen, wie beispielsweise Pflügen, aufgrund der Art des Einsatzes nicht vernachlässigt werden können, und somit typischerweise einen erheblichen Anteil im Referenzzyklus darstellen müssen.

2. Ausblick

Aufgrund der geringen Anzahl von Messfahrten konnten hohe Korrelationen, wie in Kapitel 2.9.3 beschrieben, nur teilweise gefunden werden. Zukünftig sollten aus jedem Bereich der Anwendungen, sei es Grünland, Bodenbearbeitung, Transport, Forst und optionalem Winterdienst mehrere Messfahrten vom Kunden bereitgestellt werden, um gewisse Applikationen besser zu verstehen. Zusätzlich kann auf diese Weise bei einer größeren Datenmenge das in dieser Arbeit dargestellte Potential der Korrelationsanalysen besser genutzt werden.

Bezüglich der in Kapitel 2.9.1 durchgeführten Normierung kann festgehalten werden, dass diese für den Prozess der Referenzzyklenentwicklung nicht zwingend erforderlich ist und somit in Zukunft vernachlässigt werden könnte. Für weiterführende Detailbetrachtungen stellt diese Methode aber ein probates Mittel dar.

VI. Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 8402:1995 Abschnitt 2.17
- [2] DIN EN ISO 8402:1995 Abschnitt 2.18
- [3] Rabe, M.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik, Springer Verlag 2008
- [4] AVL List GmbH: AVL- Load MatrixTM – C_FP-Systemanalyse (2013)
- [5] AVL List GmbH: AVL - Load MatrixTM – Graz (2013)
- [6] AVL List GmbH: AVL - Load MatrixTM - Process, Graz (2013)
- [7] AVL List GmbH: AVL- Load MatrixTM – Definition of Damage Modell Types (2013)
- [8] Bertsche, B.; Lechner, G.: Zuverlässigkeit im Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin 1999
- [9] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg/New York 2006
- [10] Skriptum Schadensanalyse, Institut für Werkstoffkunde – TU Graz; 2011
- [11] EMPA, Christian Bach; SSM- Tagung Sept. 2007
- [12] Brenn Günter, Skriptum Strömungslehre und Wärmeübertragung I, 2006
- [13] Knapp, R.T.; Daily, J.; Harnmit F.: Cavitation, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970
- [14] Klaus Denkmayr, Skriptum Zuverlässigkeitstheorie, 2010
- [15] Eichelseder Helmut, Skriptum Kolbenmaschinen, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik – TU Graz, 2005

VII. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Kennwerte einer Wöhlerkurve und Abgrenzung der Bereiche Dauerfestigkeit (D), Zeitfestigkeit (Z) und Kurzzeitfestigkeit (K) [9]	4
Abbildung 1-2: Typische Ausbildung einer Schwingbruchfläche; Anriss (A), Dauerbruch (D), Gewaltbruch (G) [9].....	5
Abbildung 1-3: mögliche Verschleißursachen [10].....	6
Abbildung 1-4: Schema - Chemische Vergiftung im SCR- Katalysator [11].....	7
Abbildung 1-5: Schematische Darstellung der Blasenimplosion [13].....	8
Abbildung 1-6: Arten der Schädigungsmodelle und deren Inputgrößen inkl. Streuband [5].....	9
Abbildung 1-7: Stribeck-Kurve [8]	11
Abbildung 1-8: Prinzip der hydrodynamischen Lagerung	12
Abbildung 1-9: Reliability Engineering als Querschnittsfunktion[14].....	13
Abbildung 1-10: Schematische Darstellung des B_{10} - Wertes als Lebensdauermaß [14]	14
Abbildung 1-11: Badewannenkurve [14].....	15
Abbildung 1-12: Arten von Referenzzyklen.....	17
Abbildung 1-13: Schematische Abbildung des Kundenverhaltens.....	18
Abbildung 1-14: Schema des V-Modells eines Entwicklungsprozesses	19
Abbildung 1-15: Arten der Referenzzyklenbestimmung.....	20
Abbildung 1-16: Schematischer Referenzzyklus	20
Abbildung 1-17: Aktuelle Trends in der Produktentwicklung - erhöhtes Risiko? [4]..	23
Abbildung 1-18: AVL Load-Matrix™ Übersicht [5]	24
Abbildung 1-19: Aufbau der Systemebenen [4]	26
Abbildung 1-20: Leistungsflussdiagramm eines modernen Traktors	30
Abbildung 1-21: Applikationsmatrix am Beispiel Traktor.....	31
Abbildung 2-1: Beispiel einer typischen Grünlandanwendung.....	41
Abbildung 2-2: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment der Zyklen WP_1 (links) und WP_2 (rechts).....	42
Abbildung 2-3: Beispiel einer typischen Pflügeanwendung	43

Abbildung 2-4: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment des Zyklus Pflügen.....	44
Abbildung 2-5: Beispiel einer typischen Kreiseleggenanwendung.....	45
Abbildung 2-6: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment der Zyklen Harr_1 (links) und Harr_2 (rechts)	46
Abbildung 2-7: Beispiel einer typischen Transportanwendung	47
Abbildung 2-8: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment der Zyklen TP_H1 (links), TP_H2 (mitte) und TP_H4 (rechts)	47
Abbildung 2-9: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment der Zyklen TP_L1 (links) und TP_L2 (rechts).....	48
Abbildung 2-10: Beispiel einer typischen Holzspalteranwendung.....	49
Abbildung 2-11: Zeitanteile für Drehzahl und Drehmoment des Zyklus WC	49
Abbildung 2-12: Plot der Lastpunkte der gesamten Messdaten im Motorkennfeld ...	51
Abbildung 2-13: Leerlauf und PTO im Kennfeld	
Abbildung 2-14: Transportarbeiten im Kennfeld	
Abbildung 2-15: Schematische Darstellung Rainflow Analyse.....	54
Abbildung 2-16: Auszug aus dem Ergebnis der Schädigungsrechnung	
Abbildung 2-17: Auszug aus Normierung und Ranking	59
Abbildung 2-18: Auszug aus einer Korrelation der Tests.....	
Abbildung 2-19: Auszug aus dem Ranking.....	62
Abbildung 2-20: Auszug aus dem Ranking.....	64
Abbildung 2-21: Auszug aus der Korrelation der Schädigungsmodelle	64
Abbildung 2-22: Interpretation am Beispiel Kreiselegge	66
Abbildung 2-23: Schema Worst- Case Zyklus	69
Abbildung 2-24: Aufbau Worst- Case Zyklus	70
Abbildung 2-25: Worst- Case Zyklus	71
Abbildung 2-26: Schema Best- Case Zyklus	72
Abbildung 2-27: Aufbau Best- Case Zyklus	73
Abbildung 2-28: Best- Case Zyklus	74
Abbildung 2-29: Kennfeld – Worst- Case Zyklus (links) vs. Best- Case Zyklus (rechts)	75

Abbildung 2-30: Auszug aus Schädigungsrechnung im Vergleich der beiden Zyklen 76

Abbildung 2-31: Vorgehensweise zur Gestaltung von Referenzzyklen 81

VIII. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Technische Daten	34
Tabelle 2-2: Applikationsmatrix bis 120PS	35
Tabelle 2-3: Verteilung des Einsatzes	37
Tabelle 2-4: Auszug aus dem System Analyse - FP-Blatt	38
Tabelle 2-5: Output der Schädigungsrechnung	55
Tabelle 2-6: Normierte Auswertung der Simulation	58
Tabelle 2-7: Ranking	60
Tabelle 2-8: Korrelation Test vs. Test.....	63
Tabelle 2-9: Korrelation: Schädigung vs. Schädigung	65
Tabelle 2-10: Auswahl der Zyklen	67
Tabelle 2-11: Ranking der herausgelösten Kernoperationen.....	78
Tabelle 2-12: Vergleich des Rankings der Kernoperationen (links) und der originalen Tests (rechts).....	79
Tabelle 2-13: Vergleich der Rangbewertung aufgrund ihrer Mittelwerte	79

IX. Formelverzeichnis

Gleichung 1: Proportionalitätszusammenhänge in der Schädigungsrechnung.....	12
Gleichung 2: Raffungsfaktor im Fall linearer Schädigungsakkumulation	28
Gleichung 3: Schädigung eines eventbasierten Modells	54
Gleichung 4: Normierung der Messungen	56