

●Hagenberg ●Linz ●Steyr ●**Wels**

Dokumentation

**Pendulum Painter**

|  |  |
| --- | --- |
| **Datenaufbereitung/Visualisierung** | |
| Thema | Lastdatenermittlung |
| Betreuer | DI(FH) Dr. Christoph Heinzl |
| Name / Matrikelnummer | Julian Kastenhuber / S2010566006  Patrick Holzer / S2010566005 |
| Masterstudiengang | Entwicklungsingenieur\*in Maschinenbau |
| Abgabe | 08.02.2022 |

Inhaltsverzeichnis

[1Aufgabenstellung 3](#_Toc91163014)

[2Labview Programme (Pauli) 3](#_Toc91163015)

[3Prüfstandsmessung (Pauli) 3](#_Toc91163016)

[4Datenreduktion (Parick & Mo) 3](#_Toc91163017)

[4.1 Lastkollektiv (Mo) 3](#_Toc91163018)

[4.2 Betriebsfestigkeitsrechnung (Patrick) 5](#_Toc91163019)

[5Kennfeld (Julian) 9](#_Toc91163020)

[5.1 Messung 9](#_Toc91163021)

[5.2 Auswertung 9](#_Toc91163022)

[6Erkenntnis 11](#_Toc91163023)

[7Abbildungsverzeichnis 12](#_Toc91163024)

[8Tabellenverzeichnis 12](#_Toc91163025)

# Aufgabenstellung

# Vorbereitung

## Konfiguration von Boost

1. Laden Sie Boost\_1.78.0.zip Datei herunter (<https://www.boost.org/users/history/version_1_78_0.html>)
2. Entpacken der zip Datei nach z.B “C:\boost\_1\_78\_0“. Beliebiger Pfad wählbar, aber nachfolgende Anweisungen beziehen sich dann immer auf diesen Pfad.
3. Öffner der Kommandozeile in diesem Ordner (Rechtsklick und öffnen des Windows Terminals)
   * In der Kommandozeile “bootstrap.bat“ eingeben und dann wird boost vorbereitet für den Build.
   * Ist die Vorbereitung abgeschlossen “.\b2“ eingeben und jetzt wird boost gebildet (kann paar Minuten dauern).
4. Build abgeschlossen, wenn steht “The Boost C++ Libraries were successfully built!“

## Konfiguration und bauen von VTK in Qt

1. Starten sie CMake (cmake-gui)
2. PendulumPainter Projekt  bauen
   * Feld - "Where is the source code": Klicken sie auf Browse Source und selektieren sie als Quellpfad den Ordner "C:\Tools\Src\project\PendulumPainter" bzw. entsprechenden anderen Pfad, wo Sie den Source Code abgelegt haben.
   * Feld - "Where to build the binaries": Geben sie den Pfad " C:\Tools\Pro\project\PendulumPainter" ein. In diesen Ordner wird das PendulumPainter Projekt gebaut bzw. entsprechenden anderen Pfad, wo Sie das PendulumPainter Projekt bauen möchten.
3. Konfigurieren sie ihren PendulumPainter build:
   * Drücke "Configure".
   * Aktivieren der Checkbox "Advanced" um alle Einträge zu sehen.
   * Wahrscheinlich erhalten Sie eine Fehlermeldung, dass VTK\_DIR nicht gefunden werden konnte. Klicken Sie in diesem Fall auf die 3 Punkte im Feld VTK\_DIR und setzen Sie die Variable VTK\_DIR auf "C:/Tools/Pro/vtk", das ist der Ordner, wo VTK gebaut wurde. Ist VTK woanders gebildet, dann entsprechend diesen Pfad angeben.
   * Drücke nochmals "Configure" (müsste um vieles Schneller sein).
   * Wenn immer noch Fehler auftreten, sollten Ihnen die entsprechenden Meldungen einen Hinweis darauf geben, was zu tun ist, um sie zu beheben.
   * Wenn keine Fehler mehr auftreten und am unteren Ende des Protokolls "Configuring done" angezeigt wird, drücken Sie auf "Generate".
4. PendulumPainter ist nun bereit, Sie können auf „Open Project“ klicken. Stellen Sie sicher, dass mit der richtigen Visual Studio Version geöffnet wird, falls mehrere Versionen installiert sind.
5. Projektmappe erstellen
   * Die Debug-Konfiguration sollte in Visual Studio vorausgewählt sein. Über Erstellen >> Projektmappe erstellen kann der Build ausgelöst werden.
   * Wenn der Build ohne Fehler abgeschlossen wurde, sollte PendulumPainter betriebsbereit sein.
6. Legen Sie "PendulumPainter" als Startprojekt fest. Dazu klicken wir im Projektmappen-Explorer mit der rechten Maustaste auf unser "PendulumPainter"-Projekt (direkt unter ALL\_BUILD) und wählen "Als Startprojekt festlegen". " PendulumPainter " sollte nun in fetter Schrift erscheinen. Dieses Projekt ist nun als Startprojekt ausgewählt.
7. Entsprechende Pfade definieren:  
   Da wir unserem Programm mitteilen müssen, in welcher Umgebung es laufen soll, d.h. auf welche Bibliotheken und \*.dlls es Zugriff haben soll, müssen wir die Umgebung angeben. Dies kann durch einen weiteren Rechtsklick auf das Projekt " PendulumPainter " im Projektmappen-Explorer geschehen. Ganz unten finden Sie den Menüpunkt "Eigenschaften". Klicken Sie diesen an und es öffnet sich ein weiteres Fenster mit allen Projekteigenschaften.
   * Unter Debugging, um alle Debugging bezogenen Einstellungen dieses Projekts anzuzeigen. Suchen Sie nach dem Eintrag „Umgebung“ und geben Sie unsere Umgebung ein: PATH=$(PATH);C:\Tools\Pro\vtk\bin\Debug;C:\Qt\5.15.2\msvc2019\_64\bin; (Stellen Sie sicher, dass Sie das ";" am Ende nicht vergessen. Andernfalls werden die Dlls möglicherweise nicht gefunden.
   * Um Zugriff auf die Boost Bibliothek zu haben, müssen wir noch unter C/C++ >> Allgemein >> Zusätzliche Includeverzeichnisse den Boost Pfad hinzufügen. Dazu rechts über das Dropdown bearbeiten anklicken und eine neue Zeile hinzufügen mit dem Pfad “C:\boost\_1\_78\_0“. Weiters muss unter Linker >> Allgemein >> Zusätzliche Bibliotheksverzeichnisse folgender Boost Pfad hinzugefügt werden. Dazu wieder rechts über das Dropdown bearbeiten anklicken und eine neue Zeile hinzufügen mit dem Pfad “ C:\boost\_1\_78\_0\stage\lib“.
   * Bestätigen Sie die eingegebenen Einstellungen durch Drücken von ok.
8. PendulumPainter sollte jetzt startbereit sein. Drücken Sie die Wiedergabetaste neben dem lokalen Windows-Debugger im oberen Bereich von Visual Studio.

# Klassen

## ShericalPendulum::SphericalPendulum

In dieser Klasse werden alle mathematischen Algorithmen durchgeführt. Das Herzstück ist die Lösung der Differenzialgleichen für das 3D-Pendel. Als Grundlage für die Aufstellung der Lagrangeschen Bewegungsgleichungen dient das ungedämpfte spärische Pendel (Abbildung 2‑1) aus dem Mechanik Vorlesungsskriptum (Steiner, 2015, pp. 108-112).

Ein Bild, das Antenne enthält.

Automatisch generierte Beschreibung

Abbildung 2‑1 Sphärisches Pendel (auch Raum- oder Kugelpendel) (Steiner, 2015, p. 109)

Die dort aufgestellten Bewegungsgleichungen (5.41) und (5.42) werden um den Beitrag der Dämpfungskräfte erweitert.

Daraus ergeben sich die Lagrangeschen Bewegungsgleichungen

Aus denen erhält man die Differenzialgleichungen 2.Ordnung, die nach dem Umformen folgendermaßen angeschrieben werden können

Um die Differenzialgleichungen (Ordinary Differenial Equation – ODE) mit odeint aus der boost Bibliothek lösen zu können, muss eine Orderreduktion ODEs 1.Ordnung durchgeführt werden.

x[0] x[1] dxdt[0] dxdt[1]

x[2] x[3] dxdt[2] dxdt[3]

Das heißt, die ODEs 2. Ordnung werden in folgende ODEs 1. Ordnung übergeführt

dxdt[0] = x[1];  
dxdt[1] = x[3] \* x[3] \* sin(x[0]) \* cos(x[0]) - g / r \* sin(x[0]) - d \* x[1] / m;  
dxdt[2] = x[3];  
dxdt[3] = -((2 \* x[3] \* x[1] \* cos(x[0])) / sin(x[0])) - d \* x[3] / m;

Dieses Differenzialgleichungssystem ist in der Function SphericalPendulum::defineODESystem definiert.

Das ODE-System wird dann in die Funktion SphericalPendulum::integrateODE übergeben. Die Startwerte, Berechnungszeit, Pendellänge sowie der Dämpfungsparameter werden über das GUI vom Benutzer eingegeben und mittels set-Funktionen in der Klasse definiert. Die Lösung des ODE-Systems wird mittels Vector- und Matrixreferenzen ausgegeben.

Durch eine get-Funktion SphericalPendulum::getMatVTK werden die benötigten Winkeländerungen pro Zeitschritt für die 3D-Pendelbewegungen sowie die x- und y-Koordinaten für die Darstellung der 2D-Kurve in einer Matrix ausgegeben.

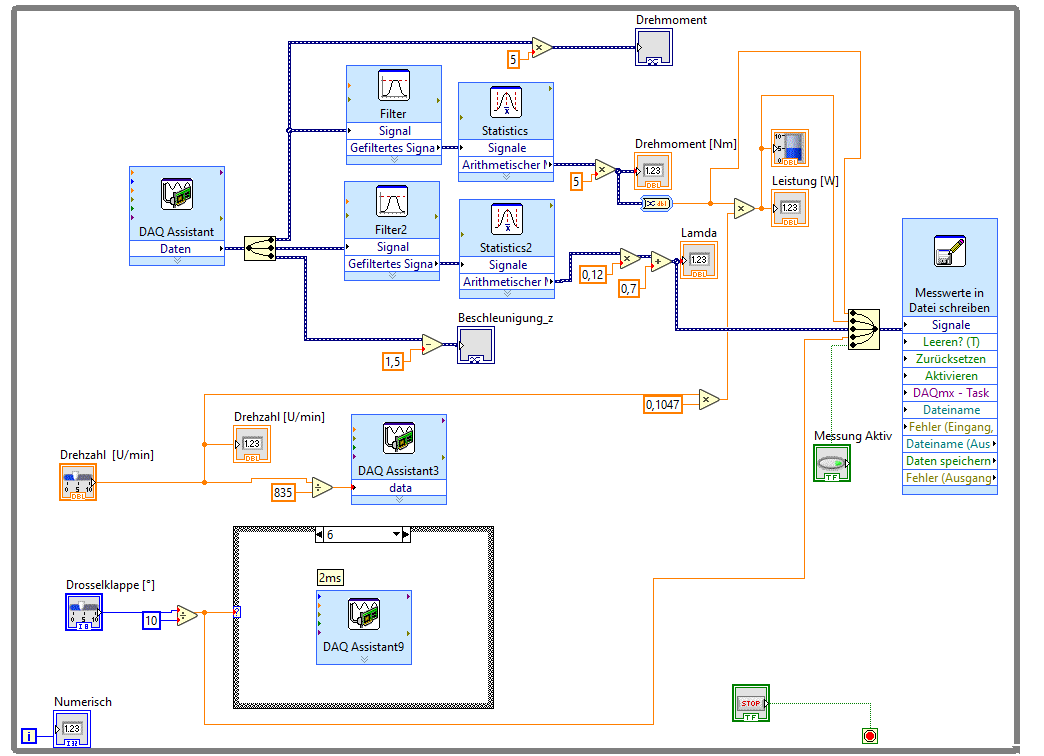
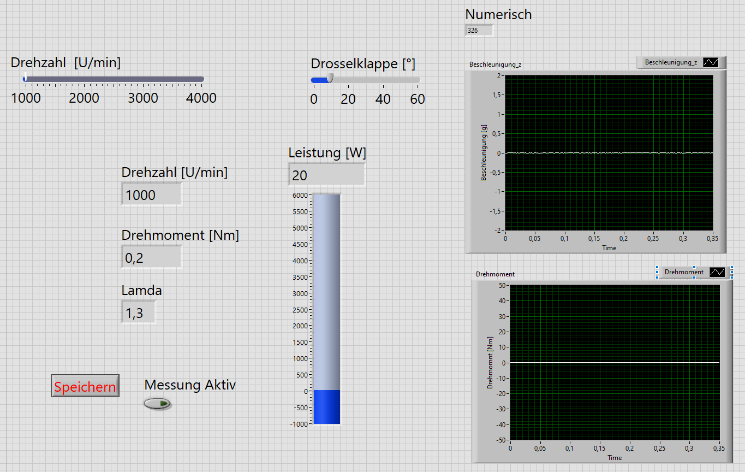


Abbildung 2‑1 LabVIEW Programm Betriebsdatenerfassung

Zur Ermittlung des Lastkollektivs sind jedoch genauere Messdaten erforderlich. Dies wurde mittels des unten angeführten Programms realisiert (Abbildung 2‑2). Hierbei werden die Sensordaten des Drehmomenten Sensors mit einer Abtastfrequenz von 1 kHz und einer Dauer von 1s direkt erfasst und anschließend mit dem zur Umrechnung in ein Drehmoment notwendigen Faktoren multipliziert. Diese Messung wurde bei 2000 U/min mit einer Drosselklappenstellung von 40° und einem Lambda Wert von durchschnittlich 1,9 erfasst. Die darauffolgende Lastkollektivermittlung erfolgt in Kapitel 4.1.

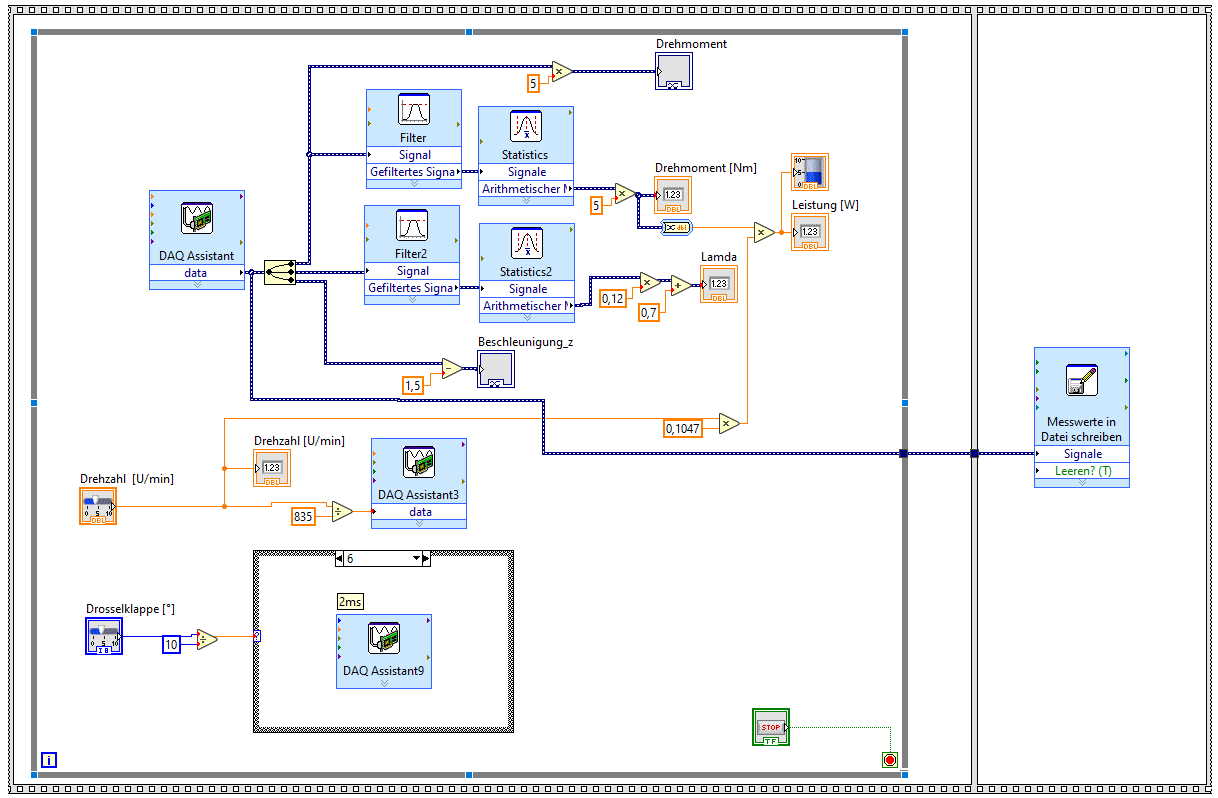


Abbildung 2‑2 LabVIEW Programm Lastkollektiv

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | | **Drosselklappenstellung** | | |
| **10°** | **30°** | **50°** |
| **Drehzahl** | **1500 1/min** | X | X | X |
| **2000 1/min** | X | X | X |
| **2500 1/min** | X | X | X |

Tabelle 3‑1: Testplanung Kennfeld

# Kennfeld (Julian)

## Messung

Messdaten sind für jeden Betriebspunkt (siehe Testplanung Tabelle 3‑1) einmal aufgezeichnet worden. Die zugeführte Kraftstoffmenge betrug jeweils 5ml Ethanol (89%), entsprechend ergeben sich verschiedene Messdauern. Folgende Messdaten (Tabelle 5‑1) sind für jede Messung aufgezeichnet worden.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Zeit  (s)** | **Drehmoment M (Nm)** | **Leistung P (W)** | **λ (-)** | **Drosselklappenstellung (DKS)  ( °)** |
| 0,5 | 5,76305 | 906,960936 | 0,973026 | 10 |
| 1 | 6,122706 | 963,561753 | 0,99554 | 10 |
| 1,5 | 5,526389 | 869,716331 | 1,003241 | 10 |
| 2 | 4,906203 | 772,114434 | 0,999105 | 10 |
| … | … | … | … | … |

Tabelle 5‑1: Beispiel Messdatenreihe

## Auswertung

Für die Darstellung der Messdaten in einem geeigneten Diagramm werden Mittelwerte für das Drehmoment, die Leistung und das Verbrennungsluftverhältnis λ pro Betriebspunkt berechnet.

Für die Ermittlung des Wirkungsgrades muss die zugeführte Energie ermittelt werden. Grundlage dafür ist der Heizwert[[1]](#footnote-1) von 100%-igem Ethanol, dieser beträgt . Der Heizwert kennzeichnet die Energie, die bei der Verbrennung ohne Kondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes freigesetzt wird[[2]](#footnote-2). Dieser wird auf den verwendeten 89%-igen Ethanol umgerechnet.

Daraus ergibt sich mit der Menge des Ethanols () die zugeführte Energie

Die genutzte Energie ergibt sich anschließend mit der gemittelten Leistung und der Messdauer

Anschließend kann der Wirkungsgrad berechnet werden

In der nachfolgenden Tabelle 5‑2 sind alle gemessenen bzw. ermittelten Daten enthalten. Zur Messdauer ist anzumerken, dass der Start- bzw. Stop-Zeitpunkt durch Beobachten der Füllstandshöhe manuell erfolgte. Durch die Vibrationen, welche durch den Motor erzeugt werden, ist das Ablesen schwierig und ein größerer Fehler in den Messreihen sehr wahrscheinlich. Folglich ist der Wirkungsgrad ebenfalls fehlerbehaftet. Die Einstellung von   
λ = 1 erfolge ebenfalls manuell, was nicht ganz einfach war. Daher sind hier auch Abweichungen vorhanden, welche das Kennfeld auch wesentlich beeinflussen.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **DKS  (°)** | **Drehzahl n  (1/min)** | **Messdauer  tmess (s)** | **Mittelwerte** | | | **Enutz  (wh)** | **η (%)** |
| **Drehmoment  (Nm)** | **P  (W)** | **λ (-)** |
| 10 | 1500 | 29 | 5,66 | 890,79 | 0,98 | 7,18 | 27,47 |
| 10 | 2000 | 34,5 | 3,62 | 761,31 | 1,03 | 7,30 | 27,93 |
| 10 | 2500 | 31 | 1,82 | 475,63 | 1,06 | 4,10 | 15,68 |
| 30 | 1500 | 20 | 10,48 | 1648,81 | 1,01 | 9,16 | 35,07 |
| 30 | 2000 | 15 | 11,25 | 2362,57 | 0,98 | 9,84 | 37,69 |
| 30 | 2500 | 13,5 | 10,58 | 2769,14 | 1,00 | 10,38 | 39,75 |
| 50 | 1500 | 18 | 10,65 | 1676,49 | 1,05 | 8,38 | 32,09 |
| 50 | 2000 | 13 | 11,86 | 2490,65 | 1,01 | 8,99 | 34,43 |
| 50 | 2500 | 12,5 | 12,06 | 3157,92 | 1,03 | 10,96 | 41,98 |

Tabelle 5‑2: Auswertung Messdaten

Mit diesen Daten kann ein Motorkennfeld dargestellt werden. In diesem ist das Drehmoment und der Wirkungsgrad über der Drehzahl abgebildet.

Abbildung 5‑1: Motorkennfeld

# Erkenntnis

Ein auf den ersten Blick sehr schwierig zu bewertendes Messsignal kann mittels Lastkollektive auf ein überschaubares Datenspektrum reduziert werden. Dabei werden die Messdaten auf deren Maxima bzw. Minima mit den entsprechenden Mittelwerten reduziert.

Oft ist die Definition der Bereiche eines Lastkollektives nicht klar ersichtlich. Als Hilfestellung können Histogramme und ein Plot von Maxima mit den dazugehörenden Mittelwerten dienen.

Das Ergebnis der Messreihe des Motorkennfeldes ist auf den ersten Blick brauchbar. Das Ziel der Aufgabenstellung, eine Testreihe zu planen und durchzuführen ist somit erfüllt.

Allerdings sind die Daten aufgrund des manuellen Eingreifens mit Fehlern behaftet. Einerseits die Messdauer mit manuellem Start und Stopp der Messungen, basierend auf visuellem Ablesen der Füllstandshöhe, was aufgrund der Vibrationen des Motors äußerst schwierig war. Weiters erfolgte die Einstellung des Verbrennungsluftverhältnisses λ ebenfalls manuell, was sich ebenfalls schwierig gestaltete, dieses immer konstant auf λ = 1 einzustellen. Die Schwankung der gemittelten λ-Werte reicht von 0,98 (= 2% Luftmangel) < 1 < 1,06 (= 6% Luftüberschuss), was doch viel ist.

Grundsätzlich kann über das Motorkennfeld folgende Aussage getätigt werden.

1. Bei abnehmender Drosselklappenstellung (Liefergrad = Verhältnis der nach Abschluss eines Ladungswechsels tatsächlich im Zylinder enthaltenen Frischladung zur theoretisch maximal möglichen Füllung) fallen der Mitteldruck und das Drehmoment. Wird die Drehzahl des höchsten Arbeitsdrucks und auch höchsten Drehmoments überschritten, fällt dadurch das Drehmoment aber die Leistung steigt wegen der steigenden Drehzahl natürlich weiter.

🡪 bei DKS 30° erkennbar  
🡪 bei DKS 50° ist der höchste Arbeitsdruck / Drehmoment noch nicht erreicht

1. Irgendwann wird die zugeführte Gemischmasse aber so wenig, das Drehmoment fällt und kann nicht mehr durch steigende Drehzahl kompensiert werden. Die Leistung sinkt bei weiter steigender Drehzahl.

🡪 bei DKS 10° erkennbar; der höchste Arbeitsdruck / Drehmoment ist vermutlich bei einer Drehzahl < 1500 1/min

# Abbildungsverzeichnis

[Abbildung 4‑1 Motordrehmomentenverlauf 4](#_Toc91163026)

[Abbildung 4‑2 reduzierten Datenpunkte (20, 11 nicht mehr dabei?) 4](#_Toc91163027)

[Abbildung 4‑3 Histogramm Ausschlag und Mittelwert 5](#_Toc91163028)

[Abbildung 4‑4: Wöhlerkennlinie mit TAK,t,3,4 8](#_Toc91163029)

[Abbildung 5‑1: Motorkennfeld 10](#_Toc91163030)

# Tabellenverzeichnis

[Tabelle 3‑1: Testplanung Kennfeld 3](#_Toc91163031)

[Tabelle 4‑1 gewählte Lastklassen 5](#_Toc91163032)

[Tabelle 4‑2: Bauteilangaben 6](#_Toc91163033)

[Tabelle 4‑3: Parameter zur Erstellung des Wöhlerdiagramms 7](#_Toc91163034)

[Tabelle 5‑1: Beispiel Messdatenreihe 9](#_Toc91163035)

[Tabelle 5‑2: Auswertung Messdaten 10](#_Toc91163036)

1. <https://de.wikipedia.org/wiki/Ethanol> [↑](#footnote-ref-1)
2. <https://heizung.de/heizung/wissen/heizwert-brennwert-worin-liegt-der-unterschied/> [↑](#footnote-ref-2)