

University of Stuttgart
Germany

Bericht über geleistete Praktika im Zeitraum 2006 - 2011

von

Johannes Störkle

Cand. Dipl. Ing. Maschinenwesen, Universität Stuttgart

Stuttgart, den 25. October 2011

Vorwort

Im folgenden Bericht werden die von mir geleisteten praktischen Tätigkeiten während und zwischen meinem Studium im Zeitraum September 2006 bis April 2011 beschrieben.

Um ein möglichst breites Spektrum verschiedener Betriebsorganisationen, Fertigungsmethoden und Produktionsabläufe kennenzulernen wurde das gesamte Praktikum nicht in einer Firma, sondern in mehreren Praktika und Werkstudentenjobs in verschiedenen Unternehmen vgl. Kapitel Praktikumsübersicht durchgeführt. Dabei wurde das dominierende 6-monatige Praktikum bei dem Turbinenhersteller ALSTOM in Baden, CH im Rahmen meines Studiums in einem Urlaubssemester im Zeitraum von Oktober 2010 bis April 2011 durchgeführt.

Die Unternehmen sowie deren Produkte werden in Abschnitt 3.1 Vorstellung der Unternehmen und deren Produkte detailliert vorgestellt.

Die verschiedenen Praktika und Werkstudentenjobs wurden gemäß der Praktikumsrichtlinie [1] in den dort vorgegebenen Bereichen durchgeführt und entsprechend dieser Richtlinie auch dokumentiert.

Durch das Kennenlernen vieler verschiedener Unternehmen, Produkte und Abteilungen konnte ich zahlreiche praktische Erfahrungen sammeln und wertvolle Kontakte knüpfen.

Ich möchte mich ganz herzlich bei allen Mitarbeitern der verschiedenen Unternehmen und Abteilungen bedanken, die mir sehr interessante Aufgaben stellten und mich bei den Tätigkeiten unterstützten.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Inhaltsverzeichnis	4
1 Praktikumsübersicht	6
2 Tätigkeitsbericht	8
3 Technischer Bericht.....	16
3.1 Vorstellung der Unternehmen und deren Produkte	16
3.1.1 ALSTOM Power, Standort CH: Baden & Birr.....	16
3.1.2 Kernkraftwerk Leibstadt, CH	23
3.1.3 Werkstofflabor von Logistikbetriebe AG in Baden, CH	25
3.1.4 ABB Turbo Systems in Baden, CH	25
3.1.5 Bosch-Mahle Turbosystems in (BMTS) Stuttgart, Deutschland	29
3.2 FP1 Wärmebehandlung	31
3.2.1 Wärmebehandlungen bei der Turbinen-Rotorfertigung (ALSTOM, CH, Birr)	31
3.3 FP2 Werkzeug und Vorrichtungsbau	34
3.3.1 Backenfutter Spann-Berechnung (ALSTOM, CH, Birr).....	34
3.4 FP3 Instandhaltung, Wartung, Reparatur.....	39
3.4.1 Revisionskoordination (Kernkraftwerk Leibstadt KKL, CH)	39
3.5 FP4 Messen, Prüfen, Qualitätskontrolle.....	45
3.5.1 Clearance-Boroskop Messung an einer Test-GT (ALSTOM, CH, Birr)	45
3.5.2 Werkstoffprüfung im Materialprüflabor (LB, CH, Baden)	47
3.6 FP6 Fertigung, Montage	52
3.6.1 Herstellung von Turbolader Verdichterräder (ABB Turbo Systems, CH, Baden).....	52

3.7	FP7 Fabrik- und Fertigungsplanung	66
3.7.1	Arbeitsvorbereitung in der Herstellung von GT und DT (ALSTOM, CH, Birr)	66
3.8	FP9 Produktentwicklung und Produktmanagement	73
3.8.1	Versuch und Validierung von Turboladern (BMTS, Stuttgart).....	73
3.9	FP10 Fachrichtungsbezogenes Projektpraktikum	78
3.9.1	Fracture Mechanics Assessment of Structure GT Parts (ALSTOM, CH, Baden).....	78
Abbildungsverzeichnis		90
Referenzen		93
Quellen		93

1 Praktikumsübersicht

Okt. 2010 - April. 2010

Sechs monatiges Praxissemester bei **ALSTOM Power/ Gasturbine** in Baden, CH, Abt. TPGNRD Mechanical Integrity: Schwerpunktthema war die Verbesserung von Bruchmechanischen Analysen zur Bewertung von Niederfrequenten Rissen an Gasturbinen Gehäuse-Teilen. Eine erweiterte Aufgabe war unter anderem die Unterstützung bei einer Clearance-Boroskop-3D-Messung im ALSTOM Testcenter in Birr. Eine genauere Auflistung der Aufgaben ist in Dokument [2] dargestellt.

Mai. 2010 - Okt. 2010

Werkstudentenjob bei **Bosch Mahle Turbosystems** in Stuttgart, Abt. Versuch und Validierung: Unterstützung bei der Versuchsplanung, Durchführung und Auswertung von Versuchsturbolader. Programmierung eines Tools (Visual Basic) zum Erstellen von automatisierten Standard-Versuchsauswertungen. Aus Messdaten, gespeichert in Excel-Sheets, können somit sehr einfache übersichtliche Diagramme in UniPlot-Dateien erstellt werden.

Okt. 2008 - Dez. 2009

Werkstudentenjob bei **ALSTOM Power** in Birr, CH, Abt. Fertigungsplanung von der GT/ DT -Rotorfertigung: Programmierung eines Arbeitsplanungstools (Visual Basic) für mehr Transparenz der Mitarbeitertätigkeiten, Projekt zur Backenfutter-Spannberechnung bei der Drehbearbeitung von Wellenteilen.

- Sep. - Okt. 2008 Vier wöchiges Praktikum bei **ALSTOM Power** in Birr, CH, Abt. Fertigungsplanung von der GT/ DT -Rotorfertigung: Programmieren eines Checklistentools für DT/GT-Fertigungsplaner mit VBA, Einarbeitung in die Schweiß und Wärmebehandlungsverfahren von Turbinenwellen.
- Juli 2008 - Aug. 2008 Ferienjob im **Kernkraftwerk-Leibstadt (KKL), CH**: Assistent / Koordinator bei den Revisionsarbeiten im Reaktorbereich. Erstellen einer Wartungsarbeits-Statistik, Optimierung der Planung von Wartungsarbeiten
- Juli 2006 - April 2008 Ferienjob und Praktikum bei **ABB Turbo Systems AG** in Baden, CH, Abt. Fertigung von Turbolader-Verdichterräder: Arbeiten im Herstellprozess von Radial-Verdichterräder
- August 2007 Praktikum bei **Logistikbetrieb (LB)** in Baden, CH Werkstoffprüfungseinrichtung, spezialisiert auf ABB Turbosystem und ALSTOM Produkte: Durchführung verschiedener Versuche zur Kennwertermittlung, Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (ZfP) und in der Metallographie.

2 Tätigkeitsbericht

Die folgende Tabelle zeigt die Aufteilung der einzelnen Themenfelder auf.

FP1 Wärmebehandlung	1 Woche
<p>ALSTOM Power in Birr, CH</p> <p>1. Woche: (15.09.08 – 21.09.08)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Detaillierte Werksführung durch die Schweißabteilung (TIG) der Rotorenfertigung mit Hr. Bühlmann - Besichtigung der Unterpulver-Schweißanlage (UP) und Einweisung durch einen Schweißfachmann - Einarbeitung in die theoretischen Grundlagen der bei Alstom intern verwendeten Schweißverfahren an Turbinenwellen. - Analyse der Wärmebehandlungsverfahren (Normalglühen, Spannungsarmglühen) von mehrteiligen Turbinenrotoren - Verfassung eines technischen Berichts zur einfachen Erklärung der Verfahrensabläufe (3.2.1 Wärmebehandlungen bei der Turbinen-Rotorfertigung (ALSTOM, CH, Birr)) unter Aufsicht von Hr. Bühlmann <p>Betreuer / Vorgesetzter: Peter Bühlmann</p>	1 Woche
FP2 Werkzeug und Vorrichtungsbau	1 Woche
<p>ALSTOM Power in Birr, CH</p> <p>1. Woche: (27.10.08 – 02.11.08)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Analyse des spannenden Drehprozesses von mehrteiligen Dampfturbinenwellen - Klären der Aufgabenstellung und Problemanalyse: Lünettenlose Fertigung / Fliegende Fertigung, Unfallstatistik, Kontrolle vorhergehender Berechnung - Projektstart zur analytischen Backenfutter-Spann-Berechnung bei der Drehbearbeitung von Wellenteilen. - Ausarbeitung eines Technischen Berichts (3.3.1 Backenfutter Spann-Berechnung (ALSTOM, CH, Birr)) zur Berechnung. - Projektende und Vorstellung der Ergebnisse bei der Fertigungsabteilung / Diskussion mit Experten. <p>Betreuer / Vorgesetzter: Peter Bühlmann</p>	1 Woche

FP3 Instandhaltung, Wartung, Reparatur	3 Wochen
<p>Kernkraftwerk-Leibstadt (KKL), CH</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Woche: (28.07.08 – 03.08.08) <ul style="list-style-type: none"> - Besuch der mehrstündigen Einführungsveranstaltung und Sicherheitsunterweisung / Abschlusstest für die temporären Revisionsarbeiter - Kraftwerksführung durch den Nuklearteil der Anlage / Kontaminierte Zone, Containment / Reaktorbecken / Brennelemente-Wechsel von Norbert Schäuble - Analyse der Aufgabenstellung zur zeiteffizienten Koordinierung der Drywellarbeiten im Bereich des Reaktors - Schichteinteilung des Drywell-Koordinations-Team - Erstellung des Drywell-Belegungsplan in Ausweisgröße, für die 3 wöchige Revision 2. Woche: (04.08.08 – 10.08.08) <ul style="list-style-type: none"> - Anfertigung einer Ausweistafel - Konzeption einer Vorlage für die Drywell-Belegungsstatistik - Entwurf und Ausarbeitung eines Templates zur statistischen Analyse der Revisionsarbeiten in Excel - Aufnahme der Assistenzarbeiten vor Ort im Drywellbereich, nahe des Reaktors - Regelmäßige Ausweiskontrolle der Arbeiter am Eingang des Drywells 3. Woche (11.08.08 – 17.08.08) <ul style="list-style-type: none"> - Statistische Festhaltung mittels Belegungs-Protokollen - Umtragen der handschriftlichen Protokollen in Excel, Darstellung mittels Diagrammen, Bedingten Formatierungen und Analyse-Formeln - Ende der Drywell-Arbeiten - Gesamtauswertung / Gesamtanalyse aller vorgeschriebenen Arbeiten im Bereich des Reaktors - Auflistung von Vorschlägen zur Optimierung der Planung von Wartungsarbeiten im nachfolgenden Jahr - Anfertigung eines Technischen Berichts zur schnellen Einweisung zukünftiger Koordinator-Assistenten (3.4.1 Revisionskoordination (Kernkraftwerk Leibstadt KKL, CH)) <p>Betreuer / Vorgesetzter: Norbert Schäuble</p>	3 Wochen

FP4 Messen, Prüfen, Qualitätskontrolle	2 Wochen
<p>ALSTOM Power / Gasturbine in Baden/ Birr, CH</p> <p>1. Woche: (18.10.10 – 24.10.10)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Einweisung und Sicherheitsunterweisung auf dem Versuchsgelände - Besichtigung und Führung durch das neu gebaute ALSTOM Gasturbinen Testcenter in Birr durch Günter Filkorn - Unterstützung bei einer Clearance-Boroskop-3D-Messung an sämtlichen Stellen im radialen Luftspalt-Bereich des Turbinenrotors - Mitwirkung bei der Analyse und Auswertung der Messergebnisse - Verfassung eines Technischen Berichts (3.5.1 Clearance-Boroskop Messung an einer Test-GT (ALSTOM, CH, Birr)) <p>Betreuer / Vorgesetzter: Andreas Kieninger</p>	1 Woche
<p>Werkstoffprüfungseinrichtung von Logistikbetriebe AG in Baden (ABB-Zulieferer), CH</p> <p>1. Woche: (17.07.06-23.07.06)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Einweisung in Werkstoffprüfeinrichtung des ABB Zulieferers LB. - Theoretische Einarbeitung in die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (ZfP). - Begleitung und Durchführung verschiedener Zerstörungsfreien Versuche: Farbeindringprüfung, Ultraschallprüfung und Metallographie zur Kennwertermittlung - Unterstützung bei der Zerstörenden Werkstoffprüfung: Zugversuch, Kerbschlagbiegeversuch und Härteprüfung - Erarbeitung eines Technischen Berichts für die Praktikumsausarbeitung (3.5.2 Werkstoffprüfung im Materialprüflabor (LB, CH, Baden)) <p>Betreuer / Vorgesetzter: Daniel Huber / Christian Hehs</p>	1 Woche
FP6 Fertigung, Montage	2 Wochen
<p>ABB Turbo Systems AG in Baden, CH</p> <p>1. Woche: (24.07.06 – 30.07.06)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Teamvorstellung und Werksführung durch den Herstellprozess von Turbolader Komponenten. - Analyse der Abteilungstätigkeiten und Fertigungsprozesse - Einarbeitung in die Techniken des Entgratens von Turbolader Aluminium-Radialverdichterräder in der Kleinserienfertigung - Entfernen des bei dem Fräs-und Drehprozess entstanden Grates um die Funktion des Verdichterrades sicherzustellen und Verletzungen im Bereich der Montage zu vermeiden. - Beschriftung von verschiedenen Turboladerkomponenten mittels einer hochmodernen Laserbeschriftungsanlage 	2 Wochen

<p>2. Woche: (31.07.06 – 06.08.06)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Einführung in den Schleuderprozess von gefrästen Verdichterrädern zur Festigung des Materials im Bereich des Narbe sowie Test auf Mängel / Versagen bei Überhöhter Arbeitsdrehzahl - Begleitung der Schleuderarbeiten und Formulierung des Technischen Berichts hierzu - Analyse des Auswuchten bzw. Balancieren von Verdichterrädern bei ABB, Verfassung eines Technischen Berichts - Erstellung einer Arbeitsanweisung zum Durchführen des Schleppschleifprozesses - Erstellung einer Arbeitsanweisung für das Laser-Beschriften metallischer Teile - Vortrag über die Fertigungstechniken und aktuellen Entwicklungsbereiche der Radialverdichterrädern in Zusammenarbeit mit Jörg Dolt - Verfassung eines Technischen Berichts (3.6.1Herstellung von Turbolader Verdichterräder (ABB Turbo Systems, CH, Baden)) <p>Betreuer / Vorgesetzter: Ralf Hock / Christian Hehs</p>	
<p>FP7 Fabrik- und Fertigungsplanung</p>	<p>4 Wochen</p>
<p>ALSTOM Power in Birr, CH</p> <p>1. Woche: (22.09.08 – 28.09.08)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Teamvorstellung und Einarbeitung in die Fertigungsplanungsabteilung der GT/ DT –Rotorfertigung - Analyse der Struktur der Fertigungsplanung - Projektstart - Erstellung von Skizzen und Konzepten zur Verbesserung der Mitarbeiter-Tätigkeits-Planung und Überwachung für eine transparentere Arbeitsweise - Klären der Aufgabenstellung interaktives „Multiuser-Arbeitsplanungstools“ - Einarbeitung in die Grundlagen der Visual Basic Programmierung in Excel - Konzeption einer Tabelle zur globalen Tätigkeitsübersicht (Unterscheidung: Projektstätigkeiten / Nichtprojektstätigkeiten) <p>2. Woche: (29.09.08 – 05.10.08)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Konzept zur Programmierung eines Arbeitsplanungstools (in VBA / Excel) für eine strukturiertere Organisation und mehr Transparenz der Mitarbeitertätigkeiten. - Erste Programm-Entwürfe mittels „Graphical User Interfaces (GUIs)“ und Modulen zum vereinfachten Einfügen von Tätigkeiten in der Tabellenübersicht 	<p>4 Wochen</p>

<ul style="list-style-type: none"> - Ausarbeitung und Programmierung der Module zur Projektbezogenen und Nicht-Projektbezogenen Unterscheidung beim Speichern der Tätigkeiten <p>3. Woche: (06.10.08 – 12.10.08)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Einrichten des Tool bei allen Team-Mitarbeiter, persönliche Benutzer-Einweisung / Nachbesserungen - Projektdokumentation (3.7.1 Arbeitsvorbereitung in der Herstellung von GT und DT (ALSTOM, CH, Birr)) - Erfolgreiches Projektende - Beginn eines neuen Projektes zur Programmieren eines Checklistentools (in VBA / Excel, Access) für DT/GT-Fertigungsplaner zur einfacheren Erstellung von Arbeitspapieren. - Konzeption der Programmstruktur - Entwurf der Module in Excel VBA, Anfertigung mehrerer Userformen zur Visualisierung komplexer Fertigungsplanungsstrukturen <p>4. Woche: (03.11.08 – 09.11.08)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ausarbeitung und Realsierung des Programmierprojektes „Checklistentools für DT/GT-Fertigungsplaner zur einfacheren Erstellung von Arbeitspapieren“ - Vorstellung des Tools, Beratung über einen Neustart mittels MS-Access - Einarbeitung in MS-Access - Neuprogrammierung des Tool mit MS-Access Datenbanken, da die Datenstruktur für Excel zu komplex war. - Projektdokumentation (3.7.1.2 Entwicklung eines Checklistentools für die Erstellung von Arbeitspapieren) - Praktikumsende: Vorstellung des Projektstandes, Projektabbruch <p>Betreuer / Vorgesetzter: Peter Bühlmann</p>	
FP9 Produktentwicklung und Produktmanagement	4 Wochen
<p>Bosch Mahle Turbosystems in Stuttgart</p> <p>1. Woche: (03.05.10 – 09.05.10)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Einarbeitung und Teamvorstellung in der Abteilung Versuch und Validierung - Einarbeitung in die Auswerteprozesse mittels Excel Makros und der Software UniPlot - Unterstützung bei der Versuchsplanung und Organisation, Zusammenarbeit / Absprache mit Prüfstands-Ingenieuren - Begleitung der Versuchsdurchführung 	4 Wochen

<p>2. Woche: (10.05.10 – 16.05.10)</p> <ul style="list-style-type: none">- Diverse Auswertungen von Messergebnissen verschiedener Versuche am Heißgasprüfstand- Aufbereitung der Daten in Powerpoint-Präsentationen- Erstellen von Versuchsberichten nach Bosch-Mahle Standardnorm.- Ideenvorschlag zur Programmierung eines Tools (Visual Basic) zum Erstellen von automatisierten Standard-Versuchsauswertungen. <p>3. Woche: (17.05.10-23.05.10)</p> <ul style="list-style-type: none">- Projektstart: Programmierung eines Tools (Excel VBA) zum Erstellen von automatisierten Standard-Versuchsauswertungen- Konzeption der Programmstruktur- Erste Programm-Entwürfe mittels „Graphical User Interfaces (GUIs)“ und Modulen zum Festlegen von Diagrammeinstellungen- Ausarbeitung und Programmierung des VB-Quellcodes zum programmübergreifenden Datenhandling der Diagrammeinstellungen und Messdaten- Einarbeitung in die UniPlot interne Programmiersprache „UniScript“ <p>4. Woche: (24.05.10 – 30.05.10)</p> <ul style="list-style-type: none">- Programmierung einer Schnittstelle: Excel<->UniPlot in UniScript- Realisierung der Automatisierten Diagrammerstellung und Diagramm-Formatierung- Testdurchläufe- Errorhandling, Optimierung der Durchlaufzeit- Vorstellung des Tool bei der Betreuerin- Projektdokumentation (3.8.1 Versuch und Validierung von Turboladern (BMTS, Stuttgart))- Projektende	
---	--

Betreuer / Vorgesetzter: **Alina Krause**

FP10 Fachbezogenes Projektpraktikum / Produktentwicklung	23 Wochen
<p>ALSTOM Power / Gasturbine in Baden, CH</p> <p>Sechs monatiges Praxissemester in der Abt. TPGNRD Mechanical Integrity: Schwerpunkt war die Verbesserung von Bruchmechanischen Analysen zur Bewertung von niederfrequenten Rissen (LCF) an Gasturbinen Gehäuseteilen.</p> <p>Bei der Arbeit wurde eine Methode zur vereinfachten Rissberechnung entwickelt und diese in Programmen implementiert.</p> <p>Die Ergebnisse der Arbeit wurden in Technical Meetings präsentiert und schlussendlich in einem Technical Note und einer Work Instruction nach ALSTOM Standards dokumentiert.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Woche: (25.10.10 – 31.10.10) <ul style="list-style-type: none"> - Einarbeitung und Teamvorstellung in der Strukturmechanik-Abteilung im Alstom-Entwicklungszentrum in Baden, CH - Besuch mehrerer Einführungsveranstaltungen und Sicherheits-Unterweisungen - Softwareeinführungen und Organisation sämtlicher Berechtigungen zu Software-Lizenzen und Datenbank-Zugang - Klären der Aufgabenstellung „Verbesserung von Bruchmechanischen Analysen zur Bewertung von niederfrequenten Rissen (LCF) an Gasturbinen Gehäuseteilen“ 2. Woche: (01.11.10 – 07.11.10) <ul style="list-style-type: none"> - Literaturrecherche zu bruchmechanischen Bewertungsansätzen: Alstom-Interne Fachliteratur, Externe Fach-Literatur / Internet - Analyse des von Joachim Krauzig vorgeschlagenen Bewertungsprozesses zur einfachen Abschätzung mittels Handberechnungen und analytischen Formeln unter Verwendung von Mathcad-Sheets - Durcharbeitung der kompletten vorhandenen „Design-Directive“ (25 Seiten) Anmerkungen und Notizen - Diskussion und Beratung von Anmerkungen und Verbesserungsvorschlägen mit dem Verfasser <p>Woche 3: (08.11.10 – 14.11.10)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Projektstart: Anfertigung und Implementierung einer verbesserten Methode zur bruchmechanischen Bewertung von niederfrequenten Rissen - Verbesserung und Überprüfung der vorhandenen Mathcad-Sheets - Vorschlag: Programmierung eines Tools zum einfachen Extrahieren von bruchmechanisch relevanten FEM-Daten an kritischen Stellen 	23 Wochen

<ul style="list-style-type: none"> - Konzeption und Entwurf möglicher Algorithmen <p>Woche 4 – Woche 23 (15.11. 10 – 15.04.11)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ausarbeitung und Realisierung / Implementierung eines neu angefertigten Tools (VBA) bestehend aus mehreren Dateien zum einfachen Extrahieren von FE-Daten entlang eines auf bruchmechanischen Grundlagen basierenden prognostizierten Risspfades. - Funktionstest und Überprüfung an Berechnungsbeispielen, neuartige Lebensdauerauslegung - Implementierung einer neuartigen Methode zur bruchmechanischen Bewertung von beliebigen Feldproblemen (Spannungsfelder) mittels einem Russischen Ansatz nach „Kogaev“ in Excel - Dokumentation der Arbeit nach Alstom-Standard in einem „Technical Note“ in Englischer Sprache - Präsentation vor einem Experten-Komitee - Projektende - Anfertigung einer Zusammenfassung für den Praktikumsbericht (3.9.1 Fracture Mechanics Assessment of Structure GT Parts (ALSTOM, CH, Baden)) <p>Betreuer / Vorgesetzter: Andreas Kieninger</p>	
Summe	40 Wochen

3 Technischer Bericht

3.1 Vorstellung der Unternehmen und deren Produkte

Um einen schnellen Überblick über die verschiedenen Unternehmen und Produkte zu bekommen wurde im Folgenden eine kurze Beschreibung der einzelnen Firmen verfasst.

3.1.1 ALSTOM Power, Standort CH: Baden & Birr



Nach dem Grundstudium wählte ich die Vertiefungsfächer Thermische Strömungsmaschinen und Technische Dynamik. Dadurch wuchs mein Interesse, praktische Erfahrungen speziell in diesen Gebieten zu erlangen.

Da das Unternehmen ALSTOM eine wichtige Marktposition im Bereich Gas und Dampfturbinen hat und nur 20 km von meiner Heimat entfernt ist lag es für mich nahe, mich dort auf Praktika und einen Werkstudentenjob zu bewerben.

Zunächst führte ich nach dem Grundstudium ein 4 wöchiges Praktikum im Bereich der Fertigungsplanung bei ALSTOM am Standort Schweiz Birr durch. Im Anschluss daran bekam ich das Angebot einen Werkstudentenjob für ein Jahr in der selben Abteilung weiterzuführen.

Um kurz vor dem Absolvieren meines Studiums eine genauere Vorstellung von den für mich sehr interessanten Bereich Produktentwicklung zu bekommen, führte ich im Rahmen eines Urlaubssemesters ein 6 monatiges Fachpraktikum beim Turbinenhersteller ALSTOM am Standort Schweiz, dieses mal in Baden und Birr durch.

3.1.1.1 Fakten des Unternehmens¹

ALSTOM ist eines der führenden Unternehmen im Bereich Energie- und Transportinfrastruktur. Der global tätige Konzern engagiert sich in einer Vielzahl von Projekten auf den Gebieten Energieerzeugung, Energieübertragung und -verteilung sowie Transport auf Schiene und Wasser. ALSTOM beschäftigt rund 100.000 Menschen in 70 Ländern und erwirtschaftete 2002/2003 einen Umsatz von über 20 Milliarden Euro. Der Konzern ist seit über 125 Jahren in Deutschland aktiv.

¹ ([alsto1], 2011)



Abbildung 1: ALSTOM, Birr²

In der Schweiz beschäftigt ALSTOM über 6.000 Mitarbeitende an den Standorten in Baden, Birr, Dättwil, Turgi, Neuhausen, Lausanne und Oberentfelden. Die hier aktiven Geschäftsbereiche Energieerzeugung, Energieübertragung und -verteilung sowie Transport generieren zusammen einen Umsatz von über fünf Milliarden Schweizer Franken. Rund 90 Prozent dieses Umsatzes werden im Ausland erwirtschaftet. Die ALSTOM (CH) AG ist nicht nur eine der bedeutendsten Landesgesellschaften innerhalb des Konzerns, sondern auch eines der größten Industrieunternehmen in der Schweiz.

Im Bereich Energieerzeugung bietet ALSTOM in der Schweiz eine umfassende Marktleistung. ALSTOM Power plant, entwickelt, baut und wartet Gasturbinen- und Dampfturbinenkraftwerke, kombinierte Gas-/ Dampfturbinenkraftwerke sowie Wasserkraftwerke. Entsprechend der internationalen Bedeutung kann ALSTOM Power auf eine einzigartige Erfahrungsbasis aus unzähligen Projekten in der ganzen Welt zurückgreifen. Die von ALSTOM Power installierte Leistung zur Stromerzeugung beträgt rund 640.000 MW, was etwa 20% aller Kraftwerke weltweit entspricht.

3.1.1.2 Leistungsspektrum und Produkte des Bereiches Energieerzeugung

- Entwicklung von Gas- und Dampfturbinen sowie Fabrikation der dazugehörigen Rotoren
- Entwicklung von Generatoren für thermische und hydraulische Kraftwerke sowie Fabrikation von Generator-Rotoren für Turbogruppen

² ([alsto3], 2010)

- Fabrikation und Installation von Wasserkraftgeneratoren
- Entwicklung, Konstruktion und Installation von Industrie- und Kraftwerkesseln
- Projektierung von gesamten Kraftwerksanlagen oder Teilen davon
- Bau schlüsselfertiger Gas-, Dampf-, Kombi-, und Wasserkraftwerke in der Funktion und Verantwortung eines Generalunternehmers
- Modernisierung, Wartung, Betrieb und Unterhalt von bestehenden Kraftwerken
- Technologietransfer und Lizenzvergabe an Energieproduzenten und Kraftwerkersteller
- Projektentwicklung von Kraftwerken



Abbildung 2: ALSTOM, Birr, Rotorfactory³

3.1.1.3 Kurze Erklärung von Gasturbinen

Über die genaue Funktionsweise von einer Gasturbine kann man ganze Bücher füllen, deshalb möchte ich das Thema nur kurz anstreifen.

Eine Gasturbine funktioniert nach dem Joule-Prozess:

1. Luft wird angesaugt und mit einem Kompressor verdichtet (isentrop)
2. der komprimierten heißen Luft wird Brennstoff zugeführt, der sich entzündet und das Medium somit erhitzt (isobar)
3. die Energie die bei der Verdichtung und Verbrennung dem Strömungsmedium zugeführt wurde (Luftgemisch mit hohem Druck und einer hohen Temperatur) kann nun durch eine Turbine entspannt werden (isentrop)
4. Die Abgase werden in die Umgebung abgegeben und kühlen ab (isobar)

³ ([alsto3], 2010)

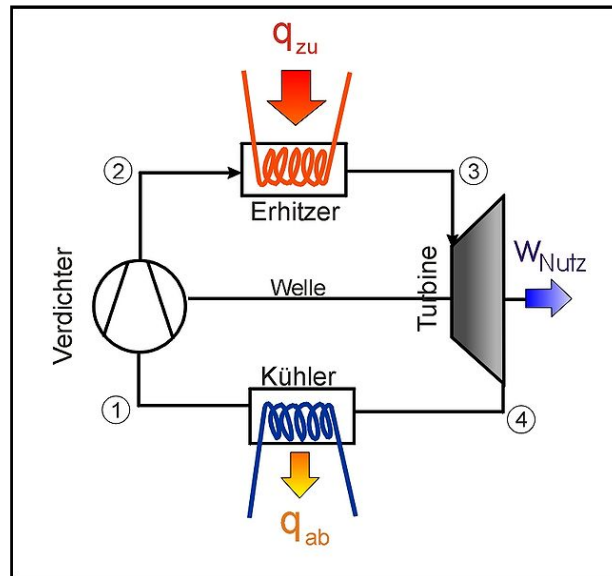


Abbildung 3: Mechanische Anordnung vom Joule-Prozess⁴

Prinzipiell unterscheidet man zwischen Industrie – und Flugzeug Gasturbinen.

Industriegasturbinen-anlagen werden in Kraftwerken zur Stromerzeugung entweder eingesetzt um Spitzenlasten zu kompensieren oder um kombiniert mit einer Dampfturbine (GuD) lokal sehr viel Strom bei einem unglaublichen Wirkungsgrad von bis zu 60% zu erzeugen. Die Industriegasturbine treibt einen Generator an, der wiederum Strom erzeugt.

Flugzeuggasturbinen sind von der Funktionsweise ähnlich aufgebaut, jedoch sind diese nicht mit einem Generator gekoppelt, sondern übertragen ihre gesamte Energie in Form von beschleunigter Strömung auf die Umgebung. Somit eignet sich diese als Flugzeugantrieb.

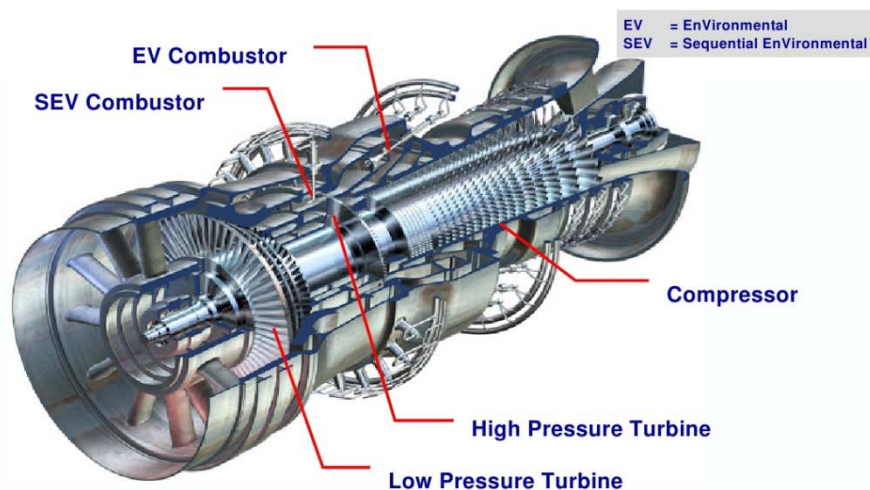


Abbildung 4: ALSTOM GT 26 Schnittdarstellung⁵

⁴ ([wiki1], 2011)

⁵ ([alsto2], 2011)

Alstom Power ist auf Industriegasturbinen spezialisiert die sich vor allem durch ihre einzigartige Doppel-Brennkammer-Technik auszeichnen. (EV+SEV Brenner)

3.1.1.4 Kurze Erklärung von Dampfturbinen

Dampfturbinen werden in Kraftwerken (Kohle, Öl, Nuklear, ...) als Energiewandler von Strömungsenergie in Mechanische Energie verwendet. Wasser wird zunächst durch Wärmezufuhr (Durch Verbrennung von Öl, Koble oder einen Reaktor...) verdampft und der Dampfturbine zugeführt. Durch den hohen Druck und die hohe Temperatur und Geschwindigkeit der Strömung werden die Schaufeln angetrieben, die fest mit dem ganzen Rotor verbunden sind. An die gleiche Welle ist ein Generator gekoppelt, der somit aus der Rotation Strom erzeugt.



Abbildung 5: Doppelflutige Niederdruckturbine⁶

Um sehr hohen Massenströme und somit hohe Energiedichten und effiziente Wirkungsgrade erreichen zu können schaltet man in der Regel mehrere Turbinen unterschiedlicher Größe hintereinander, bzw. baut man doppelflutige Turbinen, die sich einfacher lagern und betreiben lassen.

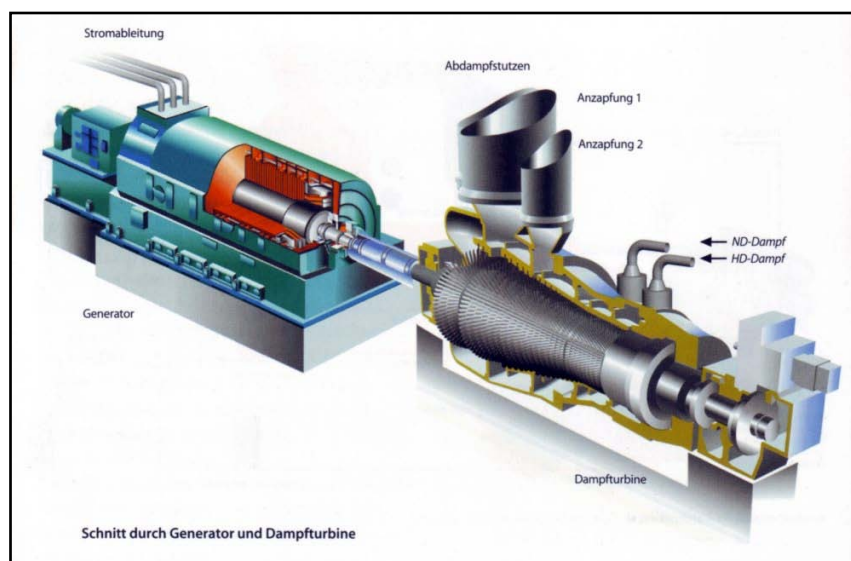


Abbildung 6: Skizze von einer einflutigen Dampfturbine gekoppelt mit einem Generator⁷

⁶ ([wiki2], 2011)

3.1.1.5 Fertigung von Dampfturbinen

Auf den folgenden Abbildungen wird der Fertigungsprozess von Turbinenrotoren in der Rotorfactory bei ALSTOM in Birr kurz dargestellt.

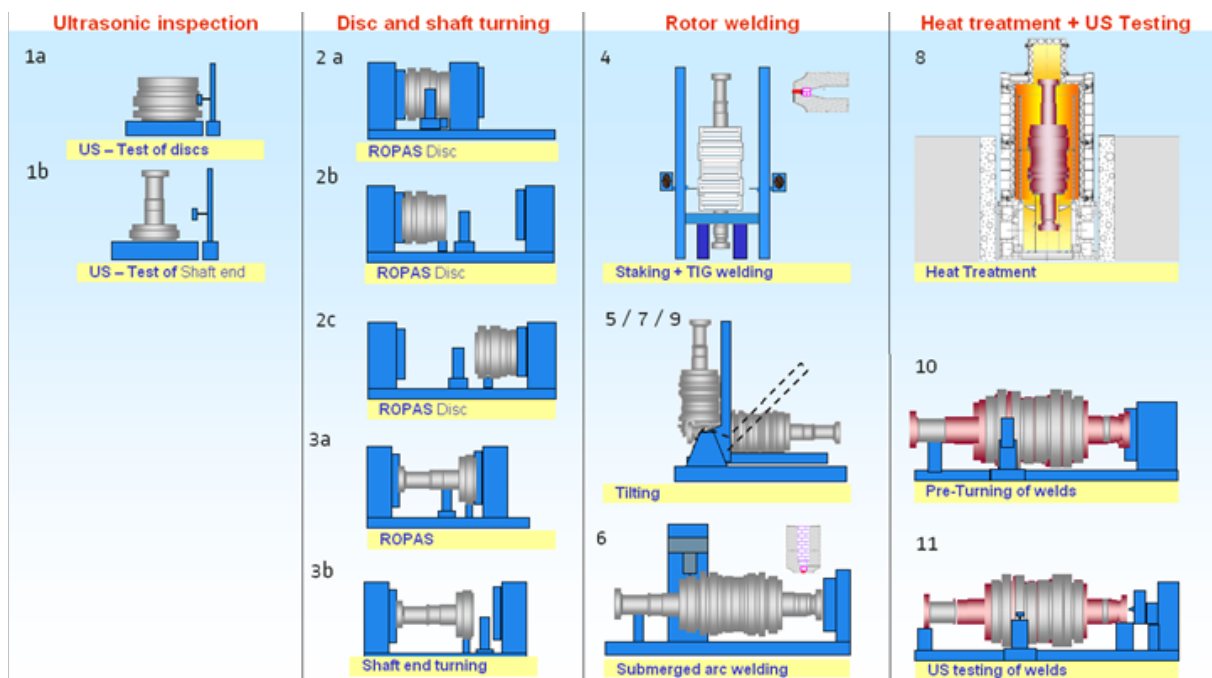


Abbildung 7: Turbine Rotor Production Process Birr, Overview1⁸

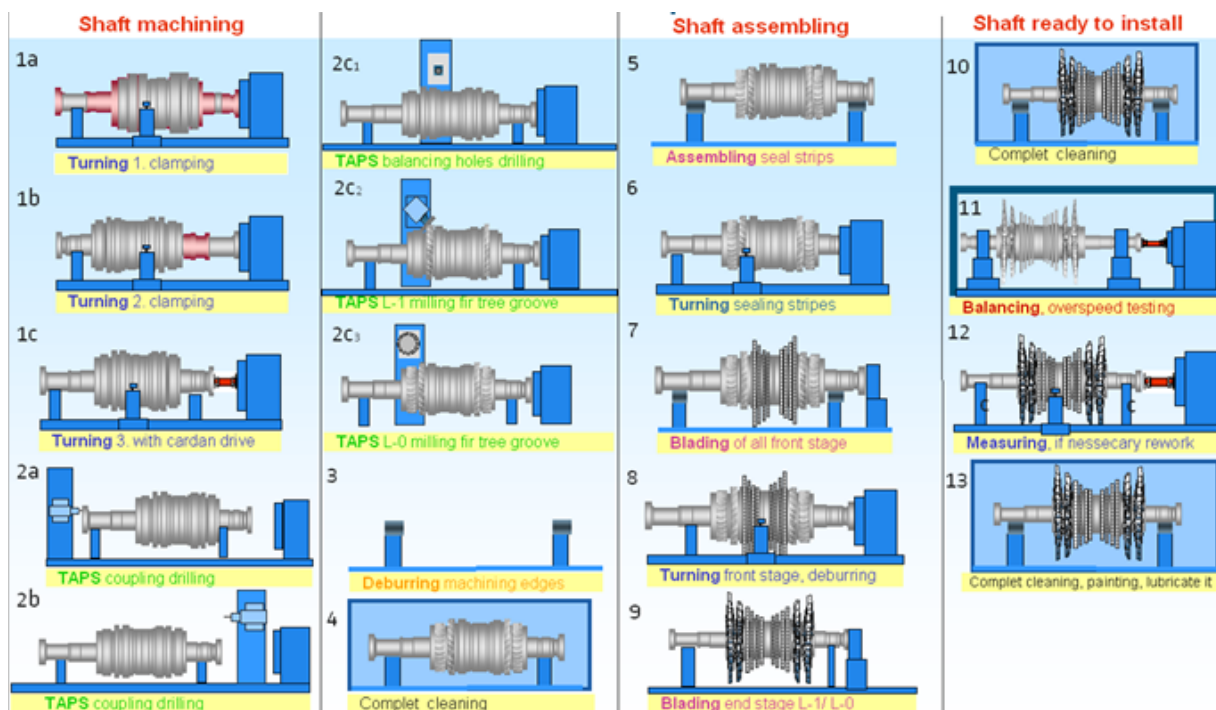


Abbildung 8: Turbine Rotor Production Process Birr, Overview2⁹

⁷ ([vattfa1], 2011)

⁸ ([alsto3], 2010)

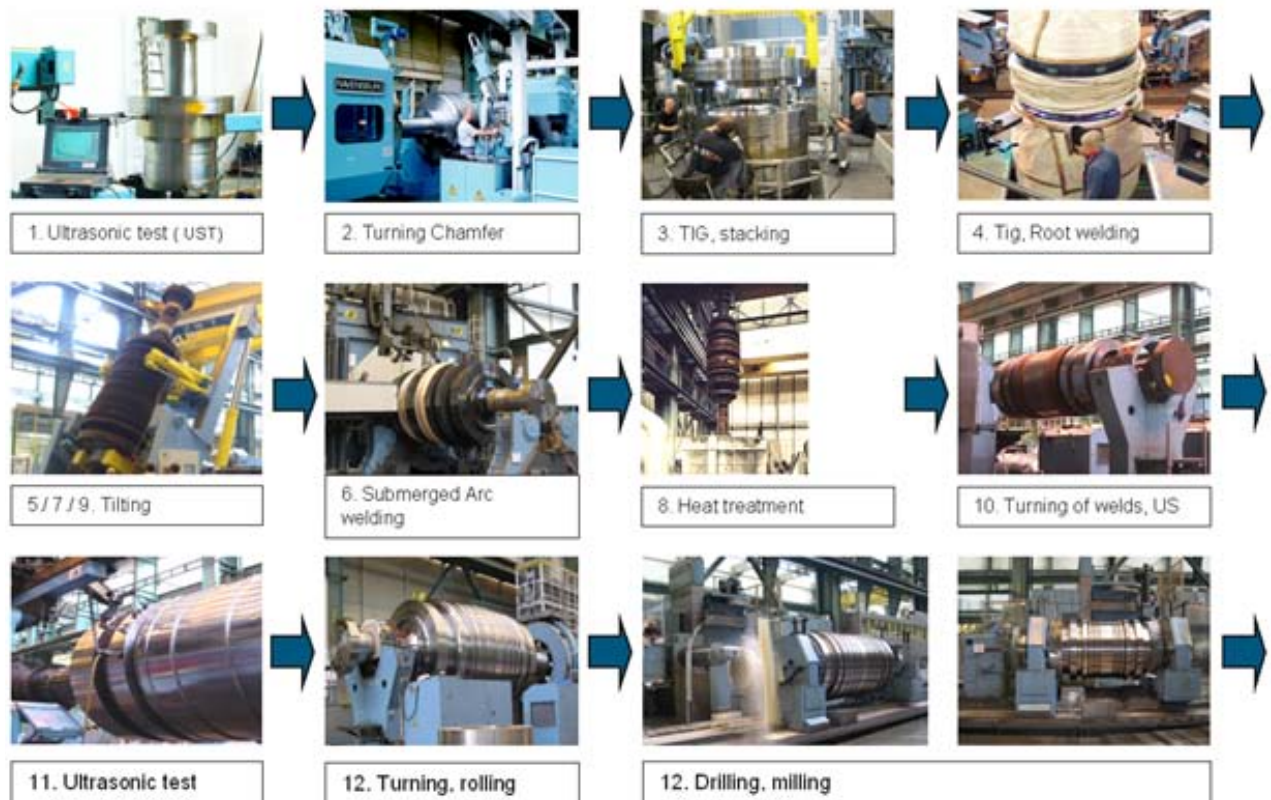


Abbildung 9: Turbine Rotor Production Process Birr, Overview3¹⁰

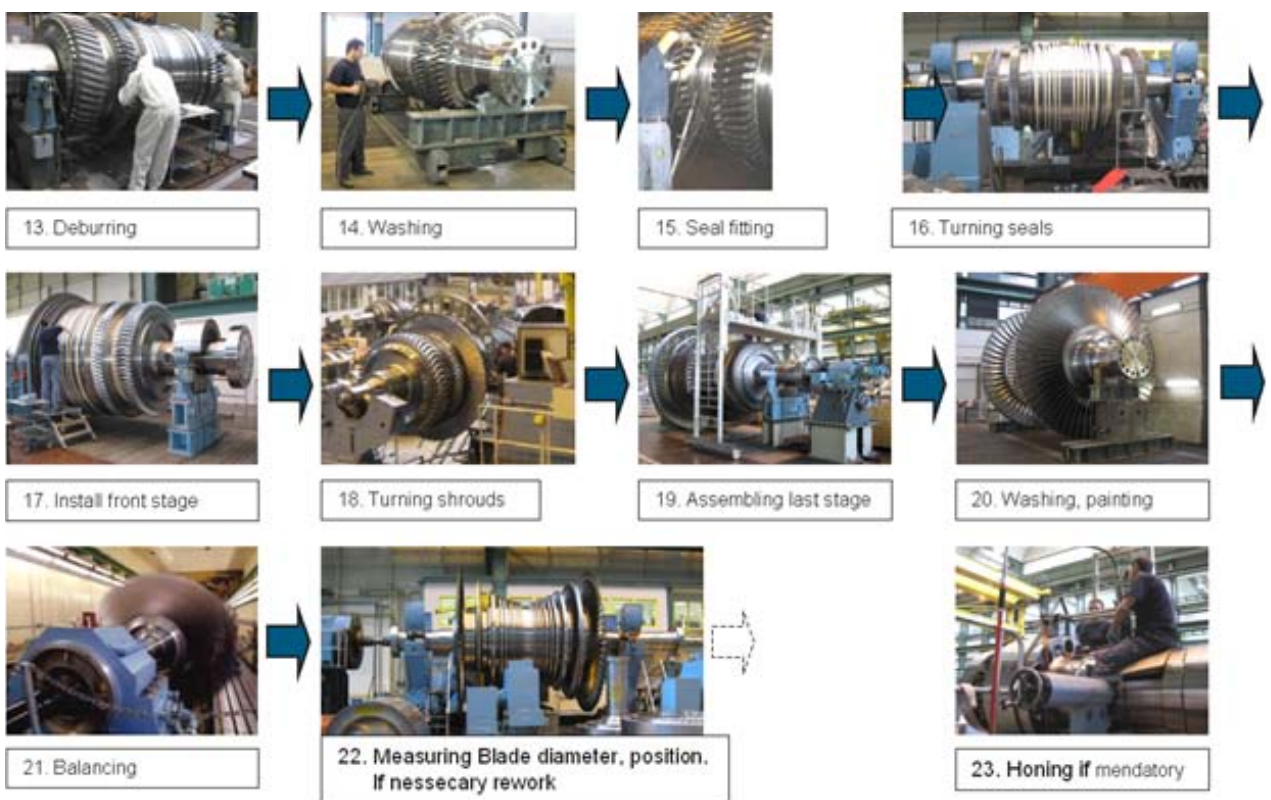


Abbildung 10: Turbine Rotor Production Process Birr, Overview4¹¹

⁹ ([alsto3], 2010)

¹⁰ ([alsto3], 2010)

3.1.2 Kernkraftwerk Leibstadt, CH



Für die Jahres-Hauptrevision vom Kernkraftwerk Leibstadt, welches nur ca. 12 km von meiner Heimat entfernt liegt, werden jedes Jahr Studenten und Aushilfskräfte gesucht, da bei hohen Sicherheitsstandards personalintensive Arbeiten verrichtet werden müssen. Da ich zwischen den Vordiplomsprüfungen im 4. Semester noch etwas Zeit zur Verfügung hatte, entschied ich mich bei den Revisionsarbeiten mitzuwirken. Ich unterstützte dabei im wesentlichen die Koordination der Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten im Drywell / Reaktorbereich.

3.1.2.1 Fakten des Unternehmens¹²

Das KKL befindet sich in Leibstadt am Schweizer Ufer des Hochrheins, unweit der Aare-Mündung bei Koblenz (CH) und Waldshut (Deutschland). Die Anlage wurde aus mehreren Gründen gerade dort gebaut. In erster Linie bestimmend ist wie bei allen Kernkraftwerken die Lage an einem großen Fluss. Im Fall von KKL ist es der Rhein, der jederzeit eine ausreichende Wasserversorgung des Kühlkreislaufs gewährleistet. Die Gegend weist zudem im Gegensatz zum engeren Alpenraum eine geringe seismische Aktivität auf, was für die Sicherheit der Anlage, selbst wenn sie für starke Erdbeben ausgelegt ist, wichtig ist. Der Anschluss ans europäische Stromnetz wird mit der Stromleitstelle Laufenburg realisiert und Abnehmer des Stroms sind im dicht besiedelten und industrialisierten Mittelland genügend vorhanden.

Für rund 450 Mitarbeiter aus der Region und dem grenznahen Ausland ist das KKL ein langfristig sicherer und attraktiver Arbeits- und Ausbildungsplatz. Für Dutzende von Lieferanten und Dienstleistern weit über die Region hinaus ist KKL ein wichtiger Partner und solider wirtschaftlicher Wert. Mit dem Einbau der neuen Niederdruckturbinen in der Jahreshauptrevision 2010 wurde eine Verbesserung des Anlagenwirkungsgrades erreicht. Damit erhöhte sich auch die Nennleistung der Anlage. Seit 1. Januar 2011 gilt die neue Netto-Nennleistung von 1190 MW

3.1.2.2 Funktionsweise des Kernkraftwerkes Leibstadt

Das KKL besteht im Wesentlichen aus den Hauptkomponenten, siehe Abbildung 11:

- 1) Reaktorgebäude
- 2) Maschinenhaus (Dampfturbinenanlage mit Generator)
- 3) Kühlturm

¹¹ ([alsto3], 2010)

¹² ([kk1], 2011)

4) Kommando – und Organisationsgebäude.

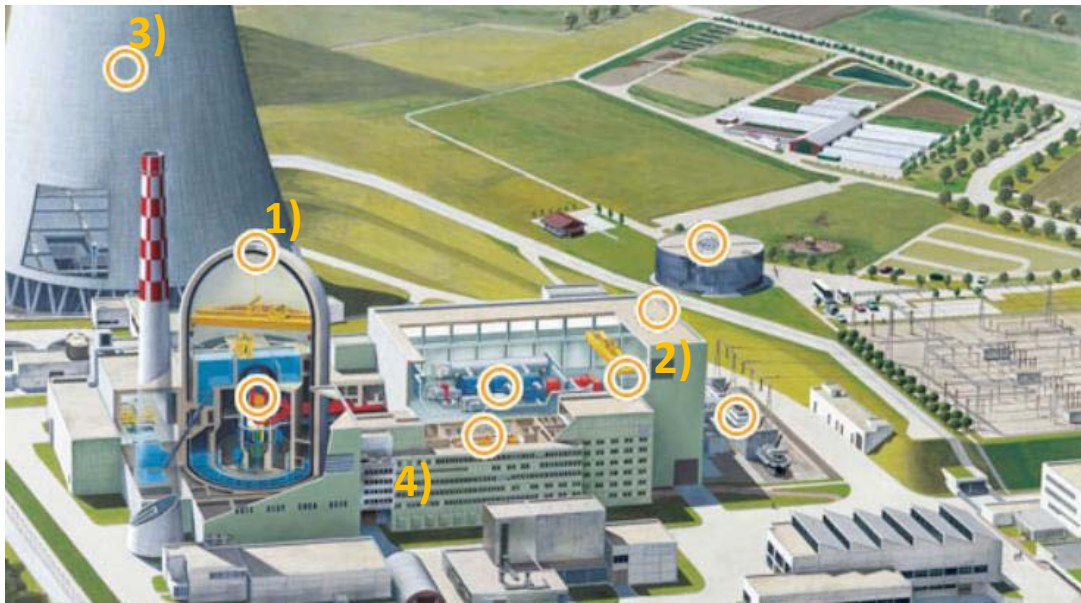


Abbildung 11: Schematische Übersicht vom Kernkraftwerk Leibstadt¹³

Das Herz der Anlage des KKL ist der Kernreaktor (in 1), sozusagen ein gewaltiger Dampfkochtopf mit einer thermischen Leistung von 3'600 MW. Es ist ein Siedewasserreaktor vom Typ BWR-6 der amerikanischen Firma General Electric. Der Reaktorkern besteht aus 648 Brennelementen mit je 96 Brennstäben in 10 auf 10 Anordnung (in der Mitte fehlen vier Brennstäbe). Sie enthalten den Brennstoff Uranoxid in Form von Brennstofftabletten, sogenannten Pellets. Das den Reaktor umgebende Druckgefäß, ein 600 Tonnen schwerer Stahlkessel, ist aus 16 Zentimeter dickem Stahl, hat einen Durchmesser von 6 Metern und eine Höhe von 22 Metern. Es schließt neben dem Reaktorkern den Wasserabscheider, den Dampftrockner und die Steuerstäbe ein.

Das KKL unterscheidet sich von anderen thermischen Anlagen wie Gas- oder Kohlekraftwerken lediglich durch die Art der Wärmeerzeugung. Nur wird im KKL dazu nichts verbrannt; die Wärme entsteht durch die Spaltung von Uranatomkernen in den Pellets. Diese Wärme erhitzt das Wasser im Reaktor und Dampf entsteht. Das geschieht unter rund 73 Bar Druck, damit der Siedepunkt auf rund 280 °C steigt und der Dampf möglichst viel thermische Energie aufnehmen kann. Er wird anschließend getrocknet und auf die Dampfturbinen (in 2) geleitet, die er wie Windräder antreibt. Die Turbinen wiederum sind über ihre Achse mit dem Generator verbunden und drehen ihn mit, sodass er gleich einem riesigen Fahrraddynamo Strom erzeugt. Thermische Energie wird also in mechanische und dann in elektrische Energie umgewandelt.

Der aus den Turbinen kommende Wasserdampf hat jedoch noch eine relativ hohe Temperatur (und vor allem eine hohe Entropie). Um das Medium wieder auf den flüssigen Zustand zurückzuführen muss man Wärme abgeben, sie in einem separaten Kühlkreislauf durch den Kühlturm (3)abgeführt wird.

¹³ ([kkl1], 2011)

Die gesamte Anlage wird dabei von der Kommandozentrale aus gesteuert und von den Mitarbeitern im angrenzenden Bürogebäude geleitet und organisiert. (in 4)

3.1.3 Werkstofflabor von Logistikbetriebe AG in Baden, CH



Während meiner Tätigkeit bei ABB Turbo Systems im Rahmen eines Ferienjobs durfte ich das Zuliefer-Unternehmen LB Logistikbetriebe AG in Form eines einwöchigen Kurzpraktikums im Prüflabor kennenlernen.

Die LB Logistikbetriebe AG ist ein anerkanntes Logistik-, Dienstleistungs- und Handelsunternehmen, mit eigener Werkstoff- und Materialprüfung, das die Kundenbedürfnisse speziell in den Marktsegmenten Auftrags-, Betriebs- und Büromaterial abdeckt. Die Kunden sind hauptsächlich Unternehmen im Maschinen-, Apparate- und Anlagenbau sowie im Dienstleistungsbereich. Der Markt von LB erstreckt sich über die ganze Schweiz, das übrige Europa, USA und Asien.

Die LB Logistikbetriebe AG versteht sich als innovativer Logistiker, der Dienstleistungen und Produkte von hoher Qualität und zu marktführenden Preisen anbietet. 1993 aus ABB hervorgegangen, hat LB sein Produkte- und Leistungsangebot wie auch seinen Kundenkreis sukzessive erweitert: Über 1000 Kunden profitieren heute von den zahlreichen Leistungen des führenden Logistikunternehmens in der Schweiz.¹⁴

3.1.4 ABB Turbo Systems in Baden, CH



Vor und während dem Vordiplom arbeitete ich als Ferienjobber und Werkstudent bei der ABB Turbo Systems AG in Baden (CH, Kanton Aargau).

3.1.4.1 Fakten des Unternehmens¹⁵

Die ABB Turbo Systems AG ist eine selbständige Tochtergesellschaft der ABB Gruppe und beschäftigt in Baden ca. 800 Mitarbeitende und weitere 800 Mitarbeitende im weltweiten Netz von Servicestellen. Die ABB Turbo Systems AG ist bei der Aufladung (mittels Abgasturboladern) von Diesel- und Gasmotoren im Leistungsbereich oberhalb 500kW Weltmarktführer.

Die ABB Turbo Systems AG hat bislang über 280'000 Abgasturbolader produziert wovon im Moment mehr als 180'000 auf Schiffen, in Kraftwerken, in schweren Baustellen- und Minenfahrzeugen und in schweren Diesellokomotiven zum Einsatz kommen. Um einen Eindruck über diese Vielfalt der

¹⁴ ([lb1], 2011)

¹⁵ ([abb1], 2006)

Einsatzmöglichkeiten zu bekommen sind im Folgenden einige Maschinen mit ABB-Turboladern aufgezeigt.



Abbildung 12: Containerschiff und Schwere Baustellenfahrzeuge mit ABB-Turboladern



Abbildung 13: Dieselmotoren und Diesellokomotiven mit ABB-Turboladern

3.1.4.2 Produktbeschreibung / Funktionsweise eines Abgasturbolader

Bei vorgegebenen Werten für Motorgesamthubvolumen und Motornendrehzahl ist eine deutliche Leistungssteigerung bei Verbrennungsmotoren nur über die Erhöhung des Luft-Kraftstoff-Gemisches im Zylinder, das durch Verdichtung der Luft erreicht wird, möglich. Zur erforderlichen Verdichtung der Luft stehen verschiedenste angetriebene Ladertypen zur Verfügung. Neben der Stoßwellenaufladung (Kompressoren) kann die Luft entweder durch Fremdantriebe oder durch eine vom Abgas beaufschlagten Strömungsmaschine verdichtet werden. Prinzipiell lassen sich die Lader in Verdrängungslader und in Strömungslader einteilen.

Der Abgasturbolader gehört nach der obigen Einteilung zu den Strömungsladern und besteht, wie im nachfolgenden Bild dargestellt, aus einer Kombination von Verdichter und Turbine. Die beiden Strömungsmaschinen sind mechanisch über eine Welle gekoppelt. Die thermodynamische Kopplung zwischen Verdichter, Turbine und den Zylindern des Verbrennungsmotors erfolgt über die Luft- und Abgasleitungen. Der Grundgedanke von Abgasturboladern liegt darin, dass dem Motor mehr Verbrennungsluft beziehungsweise Luft-Kraftstoff-Gemisch zugeführt werden kann und somit eine höhere Leistung verfügbar ist. Hierbei wird die Energie der Motorabgase genutzt, um ein Turbinenrad anzutreiben, das auf einer gemeinsamen Welle mit einem so genannten Verdichterrad läuft. Dieses Rad saugt Frischluft von der Umgebung an und leitet die verdichtete Luft in den Verbrennungsraum des Motors.

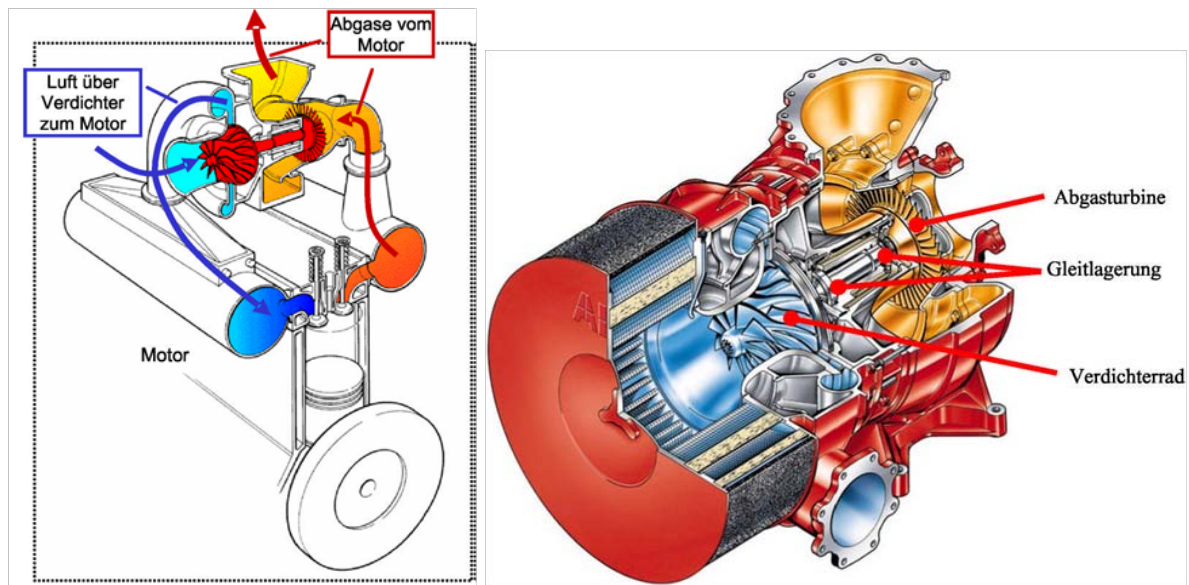


Abbildung 14: Funktion und Schnittmodell eines Turboladers¹⁶

Im Gegensatz zu den Abgas-Turboladern werden Kompressoren (Verdrängungslader) meist direkt von der Kurbelwelle oder über Riemen angetrieben. Kompressoren haben gegenüber Abgasturboladern den Vorteil, dass sie auf gewünschte Drehzahlerhöhungen direkt ansprechen und deshalb, dass so genannte „Turboloch“ bei geringen Drehzahlen nicht aufweisen. Der Vorteil von Abgasturboladern besteht in einer Wirkungsgradsteigerung und der damit verbunden Einsparung von Kraftstoff.

Kennzeichnende Komponenten des Turboladers sind neben der Turbine und dem Verdichterrad die Lagerung des Rotors und das Gehäuse. In Abbildung 14 ist ein Schnittmodell eines Turboladers des Typs TPL abgebildet. Darauf sind die Abgasturbine und die abgasführenden Bereiche gelb gekennzeichnet, das Verdichterrad und die Frischluftkanäle sind blau eingefärbt. Der Rotor besitzt eine innen liegende Gleitlagerung (zwischen Turbine und Verdichter).

In Tabelle 3.1 sind die fünf Turboladertypen, die im Wesentlichen bei ABB Turbo Systems produziert werden, aufgeführt. Die Typen RR, VTR und VTC stellen die alten, TPS und TPL die neuen Typen dar. Die Verdichterräder der VTR- und VTC - Baureihe sind identisch.

Turboladertyp	Leistung/kW	Merkmale
RR	500-1800	Radialturbine, innen liegende Lagerung
VTC	600-3500	Axialturbine, innen liegende Lagerung
VTR	700-18500	Axialturbine, außen liegende Lagerung
TPS	500-3000	neuer Typ mit Radialturbine
TPL	1250-25000	neuer Typ mit Axialturbine

Abbildung 15: Übersicht ABB – Turbolader

¹⁶ ([abb2], 2006)

Die Turbolader der ABB Turbo Systems AG sind nicht speziell für einen Motor konzipiert, sondern sind vielmehr für Motoren von verschiedensten Herstellern verwendbar. Dies wird bewerkstelligt, indem bei den einzelnen Baugrößen der Typen wiederum verschiedene Spezifikationen möglich sind, um den Lader an den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen. Diese Anpassungsmöglichkeit führt zu einer hohen Variantenvielfalt.

Bei den Verdichterrädern einer Baugröße gibt es verschiedene Spezifikationsmerkmale, die in funktionsrelevante und fertigungsrelevante untergliedert werden. Die funktionsrelevanten Merkmale beeinflussen im Wesentlichen die Funktion des Verdichterrads, während fertigungsrelevante Merkmale keinen bzw. kaum Einfluss auf die Funktion haben.

Ein funktionsrelevantes Merkmal ist in erster Linie die Anzahl und Geometrie der Haupt- und Nebenschaufeln. In Abbildung 16 ist auf der linken Seite ein Verdichterrad mit 11 Haupt- und 11 Nebenschaufeln zu sehen. Zudem können diese Varianten wiederum durch verschiedene Schaufeldesigns spezifiziert werden (siehe Abbildung 16)

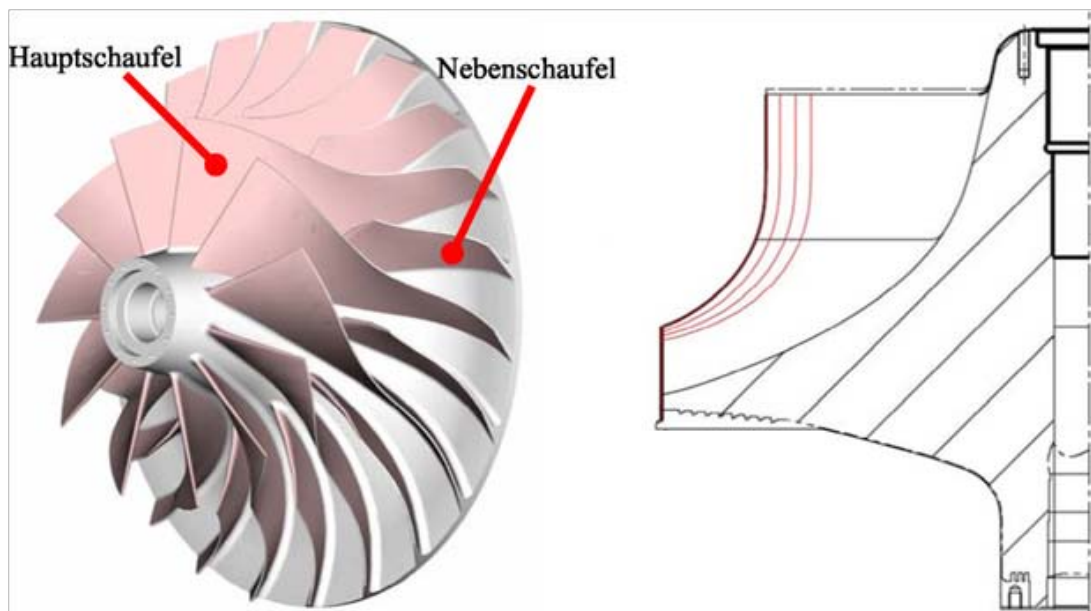


Abbildung 16: Verschiedene Schaufeldesigns bei TPL – Verdichterrädern¹⁷

Ebenfalls zu den funktionsrelevanten Merkmalen gehört die Materialwahl. Gewöhnlich werden die Verdichterräder aus einer Aluminiumknetlegierung hergestellt. Bei höheren Betriebsanforderungen besteht die Möglichkeit Titanlegierungen zu verwenden. Zu den fertigungsrelevanten Merkmalen gehören z.B. die Art der Wellen-Naben-Verbindung oder die Balanciergewindelöcher an der Verdichterseite.

¹⁷ ([abb2], 2006)

3.1.5 Bosch-Mahle Turbosystems in (BMTS) Stuttgart, Deutschland



Im 8. Fachsemester habe ich beim Abgasturbolader Hersteller Bosch-Mahle Turbosystems in Stuttgart die Abteilung "Versuch und Validierung" als Werkstudent unterstützt.

3.1.5.1 Fakten des Unternehmens¹⁸

Bosch Mahle Turbo Systems ist ein Gemeinschaftsunternehmen der Robert Bosch GmbH und der MAHLE GmbH. Beide Mutterunternehmen sind etablierte und weltweit agierende Entwicklungspartner und Systemlieferanten der OEMs, unter anderem für den Bereich Powertrain. Bosch Mahle Turbo Systems entwickelt und produziert maßgeschneiderte Abgasturbolader für Pkw sowie leichte Nutzfahrzeuge.

BMTS hat folgende Standorte:

- Stuttgart/Bad Cannstatt: Hauptsitz mit Verwaltung und technischer Entwicklung
- Blaichach/Immenstadt: Produktion von Abgasturbolader-Komponenten
- St. Michael ob Bleiburg/Österreich: Fertigungsbearbeitung und Endmontage

Bosch Mahle Turbo Systems führt alle wichtigen und qualitätsrelevanten Prozessschritte in Eigenregie durch. Dazu zählen etwa die Fertigung der Komponenten für die variable Turbinengeometrie, die Rotorfertigung (Welle, Räder), die Gehäusebearbeitung (Verdichter, Rumpffgruppe), das Wuchten sowie alle Teil- und Endmontagen. Die Gussteile werden von namhaften Lieferanten bezogen. Etwa 120 Mitarbeiter sind am Hauptsitz beschäftigt und in den Produktionsbereichen ist ein Ausbau auf etwa 250 Mitarbeiter geplant. Die Serienproduktion startet im Jahr 2011.



Abbildung 17: kleinstes Radialverdichterrad von BMTS

¹⁸ ([bmts1], 2011)

3.1.5.2 Produktbeschreibung / KFZ Abgasturbolader

Bosch Mahle Turbo Systems entwickelt und produziert maßgeschneiderte Abgasturbolader für Pkw sowie leichte Nutzfahrzeuge. Die Funktionsweise des BMTS-KFZ-Laders entspricht im Prinzip dem ABB Turbolader, beschrieben in 3.1.4.2 Produktbeschreibung / Funktionsweise eines Abgasturbolader. Lediglich technische Details wie beispielsweise die Baugröße, das Leistungsvermögen, die Material und Belastungs-Anforderungen sind unterschiedlich.

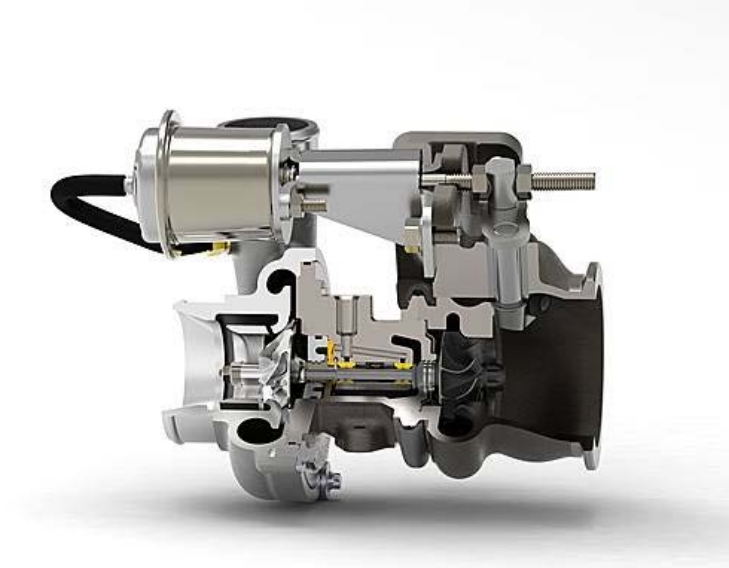


Abbildung 18: Schnittmodel von einem BMTS Abgasturbolader¹⁹



Abbildung 19: Nachbearbeitung von BMTS Turbinenrädern²⁰

¹⁹ ([bmts1], 2011)

²⁰ ([bmts1], 2011)

3.2 FP1 Wärmebehandlung

3.2.1 Wärmebehandlungen bei der Turbinen-Rotorfertigung (ALSTOM, CH, Birr)

Vor allem in der Rotorfertigung der Gas und Dampfturbinen kommen verschiedene thermische Verfahren wie Schweißen und Normalglühen zum Einsatz. Der Rotor selbst wird aus mehreren geschmiedeten Scheiben zusammengefügt. Als Schweißverfahren kommt das TIG und Unterpulverschweißen zum Einsatz. Die Scheiben bestehen aus unterschiedlichen hochfesten sowie hochlegierten Stählen, was den Schweißvorgang erschwert. Das zweite Problem sind die großen Wanddicken der Scheiben, was das Einbringen von enormer Menge an thermischer Energie notwendig macht. Um Spannungsrisse während dem Schweißvorgang zu vermeiden, müssen deshalb bestimmte Wärmebehandlungen durchgeführt werden.

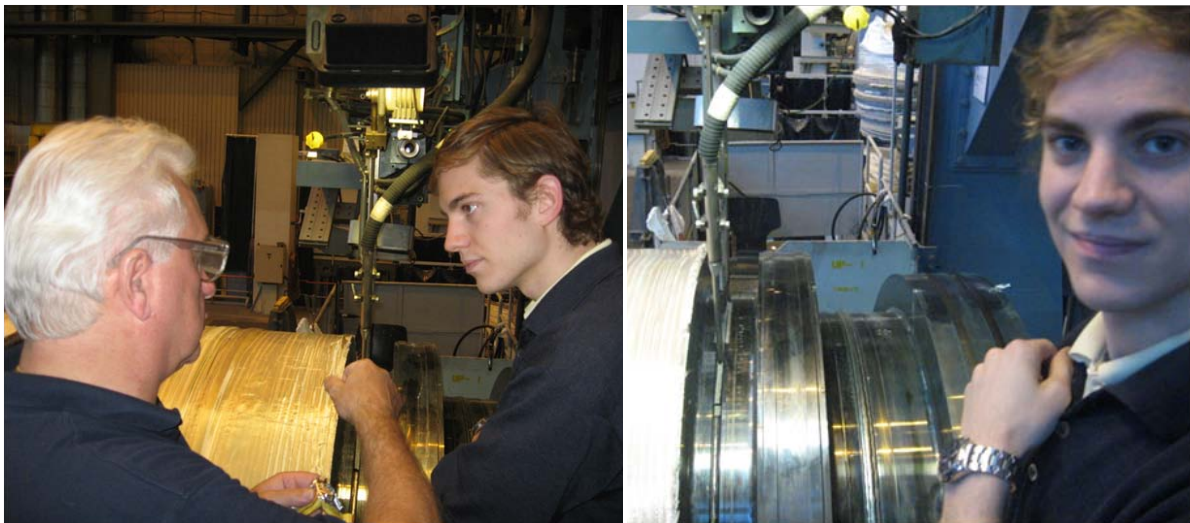


Abbildung 20: Schweiß-Prozessanalyse in der Rotorfabrik, Birr

3.2.1.1 Fügen der Wellenteile

Die Wellenscheiben bestehen in der Regel aus verschiedenen Werkstoffen, da je nach Wellenabschnitt unterschiedliche Anforderungen an mechanische und thermische Betriebsbelastungen gestellt sind. Bei Kombinationen mit sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften (z.B. sehr verschiedene thermische Ausdehnungskoeffizienten) wird zunächst eine sogenannte Puffernaht auf eine Scheibe aufgetragen.

Vor dem Zusammenfügen der Scheiben (Abbildung 7, Process 3. Stacking) wird der negative Versatz (oberen Scheibe) mit Brennern erwärmt (T_{heiz}) damit er „aufgeht“ und über den positiven Versatz (untere Scheibe) aufeinander gesetzt.

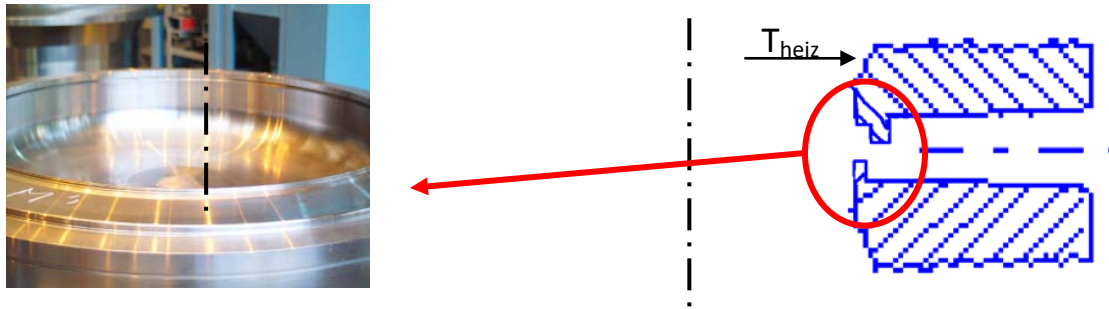


Abbildung 21: Zusammenfügen der Wellenteile

Nach dem Zusammenstellen der Welle wird die gesamte Welle induktiv aufgewärmt (Abbildung 23, rechts) um Spannungsrisse beim Schweißen zu verhindern. Die Temperaturen werden kontinuierlich mittels Thermoelemente überwacht und protokolliert. Nun wird die Grundnaht verschmolzen und anschließend durch das TIG Verfahren Verstärkungslagen angebracht. (Abbildung 7, Process 4. Stacking / Rot Verschmelzung, Orange Verstärkungslagen)

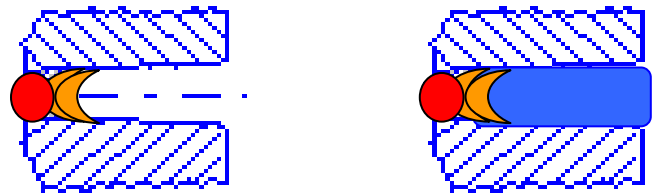


Abbildung 22: Links: TIG Schweißen, Rechts UP-Schweißen

Danach wird der Rotor in die Horizontale gebracht um die Nähte im Unterpulververfahren zu füllen (Process 3. Stacking / Blau Füllnaht). Beim Füllen der Naht wird die Temperatur nur noch mit Brennern gehalten.

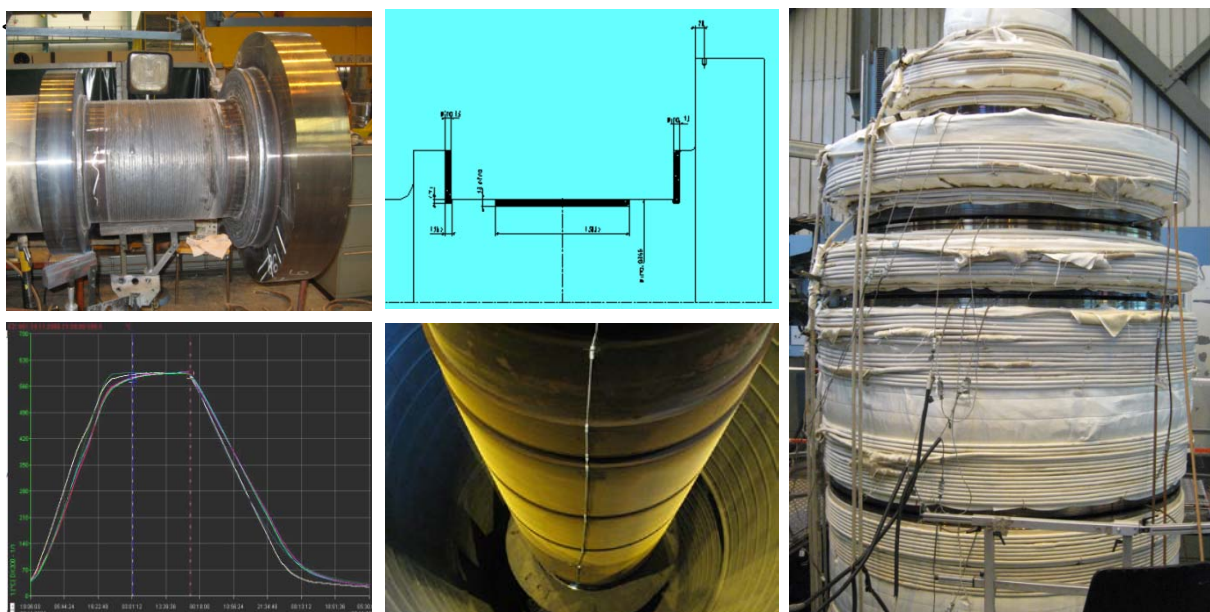


Abbildung 23: Darstellungen von Schweiß- und Wärmebehandlungsverfahren

3.2.1.2 Auftragsschweißen

Einige Werkstoffe haben schlechte Gleit- & Härte-Eigenschaften und werden deshalb im Lagerbereich durch das Auftragen von Schweißgut auf die betreffende Oberfläche verstärkt (siehe Abbildung 23 Bild links oben & Mitte oben). Anschließend werden die Lagerstellen durch spanende Nachbearbeitungen fertiggestellt.

3.2.1.3 Normalglühen

Die Turbinenrotoren werden nach Abschluss aller Schweißprozesse normalgeglüht, um Gefüge-Ungleichmäßigkeiten zu beseitigen und ein feinkörniges, gleichmäßiges Gefüge mit optimalen Festigkeits- und Verformbarkeitseigenschaften zu erhalten.

Während des Normalglühens befindet sich der Rotor in vertikaler Position. Horizontal liegend würde das durch sein Eigengewicht entstehende Biegemoment plastisches Fließen hervorrufen, die Rotationssymmetrie stören und den Rotor quasi unbrauchbar machen (Rotor ist ca. 0,5 - 180 t schwer). Die Rotorscheiben bestehen aus übereutektoiden Stählen und werden beim Glühen eine Temperatur dicht über dem oberen Umwandlungspunkt von A1 aufgeheizt und langsam abgekühlt, damit ein perlitisch-zementitisches Gefüge entsteht.

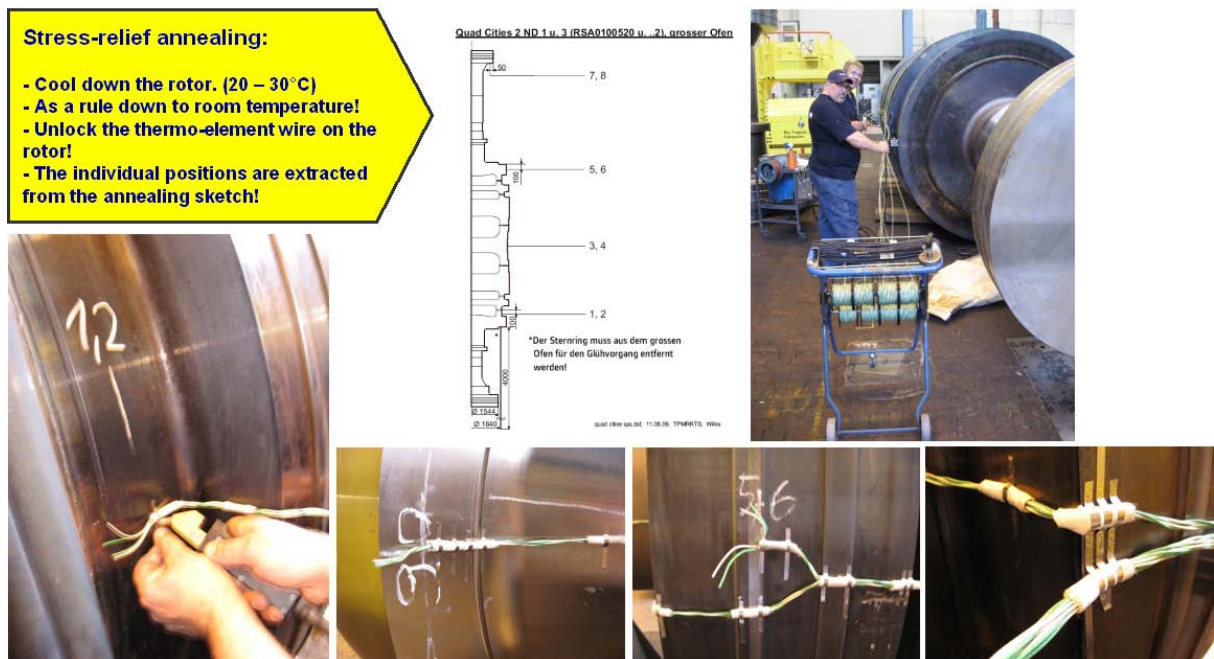


Abbildung 24: Anbringung der Thermolemente zur Temperaturüberwachung

Unterschrift Betreuer: J. Zühlbauer

3.3 FP2 Werkzeug und Vorrichtungsbau

3.3.1 Backenfutter Spann-Berechnung (ALSTOM, CH, Birr)

Während meines Werkstudentenjobs beim Turbinenhersteller "Alstom" habe ich nebenbei mitbekommen, dass die lünettenlagerungslose-Dreherspannung („Fliegende Fertigung“) von großen Turbinen-Wellenteilen in der Vergangenheit zu Problemen geführt hat. Es hat sich unter anderem die Frage gestellt: "Welche Wellen müssen mit teuren Lünettenstellen beim Drehen gelagert werden, welche nicht?". Deshalb wurden die Belastungen auf das Spannfutter sowie die Spann-Sicherheit von einem Ingenieur in einer stark vereinfachten Rechnung grob abgeschätzt.

Da ich mich Zeitgleich im Studium mit der Auslegung von Werkzeugmaschinen beschäftigte, durfte ich in einem kleinen Projekt ein eigener Vorschlag zur Bewertung dieses speziellen Problems erarbeiten. Dies ist nur ein kleiner Ausschnitt aus dem verfassten Bericht [5], der unter anderem auch Zahlenbeispiele enthält.



Abbildung 25: Berechnetes Spann-Backenfutter

3.3.1.1 Untersuchung der Sicherheit eines Vierbacken-Spannfutters beim Drehen einer Turbinenwelle ohne Lünettenlagerung

In der VDI-9555184 wird die Auslegung eines Spannfutters in einer Drehmaschine mit stark vereinfachten Ansätzen (nach "Thormählen" bzw. "Steinberger" usw.) vorgeschlagen. Um diese vereinfachten VDI-Ansätze genauer bewerten zu können wurde hierzu ein vereinfachtes Starrkörper-3D-Modell untersucht, das zu genaueren und realistischeren Ergebnissen führen soll.

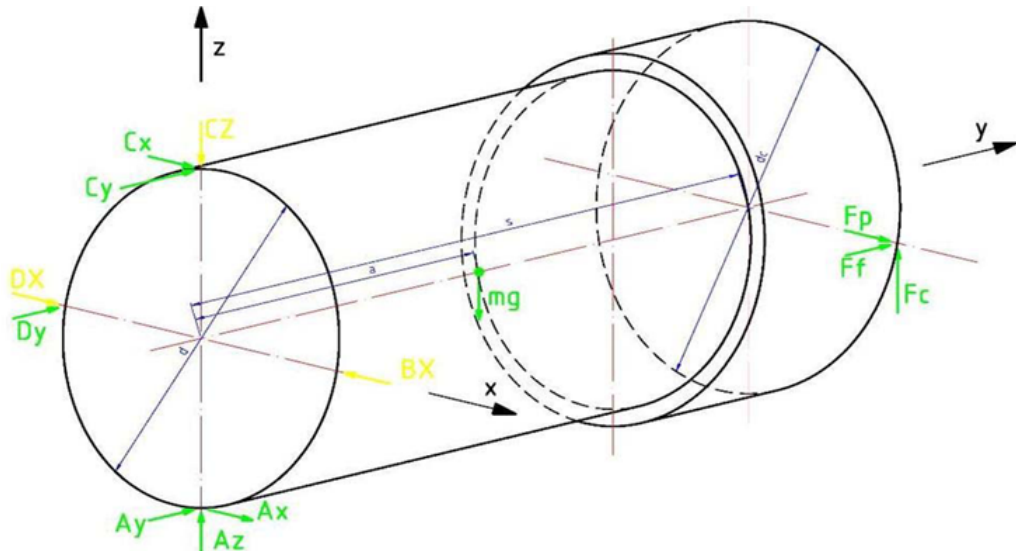


Abbildung 26: Skizze des Berechnungsmodells: Turbinenwelle beim Drehen

Die Welle wird als Starrkörper mit theoretisch 6 Freiheitsgraden $f_u = 6$ modelliert und braucht somit 6 Lagerbindungen $n_c = 6$ um statisch bestimmt $f = 0$ zu sein. Deshalb wurden die Spannkraften am Spannfutter (x-z Ebene) durch die Reaktionskräfte A_x, A_y, A_z, C_x, C_y und D_y (alle in grün) angenommen.

Im Folgenden wurde diese Spannhalter-Lagerkräfte (grün) in Abhängigkeit von der Zerspanungskraft, der Geometrie des Haftreibungskoeffizienten (es wird vereinfacht angenommen, dass μ in axialer und tangentialer Richtung gleich ist) und der Masse berechnet (zunächst werden die gelben überbestimmten Lagerreaktionen vernachlässigt).

Durch Berücksichtigung der Haftreibung an der Einspannung soll die maximal wirkende Spannkraft (radial) ermittelt werden und mit der max. Spannkraft des Backenfutters verglichen werden. Zunächst wird der statische Fall betrachtet, beidem sich die vier Spannbacken auf Position der x- und z- Achse befinden.

	A_x	A_y	A_z	C_x	C_y	D_y	F_p	F_f	F_c	mg	
$\sum F_x = 0:$	$A_x +$			$C_x +$			F_p				$= 0$
$\sum F_y = 0:$		$A_y +$			$C_y +$	$D_y +$		F_f			$= 0$
$\sum F_z = 0:$			$A_z +$						F_c	$- mg$	$= 0$
$\sum M_{x_p} = 0:$		$\frac{A_y \cdot d}{2}$		$-\frac{C_y \cdot d}{2} +$					$F_c \cdot (s - lsp) -$	$mg \cdot (a - lsp) =$	0
$\sum M_{y_p} = 0:$	$-\frac{A_x \cdot d}{2} +$			$\frac{C_x \cdot d}{2}$					$-\frac{F_c \cdot dc}{2}$		$= 0$
$\sum M_{z_p} = 0:$									$-\frac{D_y \cdot d}{2} -$	$F_p \cdot (s - lsp) + \frac{F_f \cdot dc}{2}$	$= 0$

Abbildung 27: Aufstellung der Gleichgewichtsbedingungen

$$\text{LinearSolve} \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -F_p \\ -F_f \\ -F_c + m \cdot g \\ \frac{2 \cdot (-F_c \cdot (s - l_{sp}) + m \cdot g \cdot (a - l_{sp}))}{d} \\ \frac{F_c \cdot d_c}{d} \\ \frac{2 \cdot \left(F_p \cdot (s - l_{sp}) - \frac{F_f \cdot d_c}{2} \right)}{d} \end{bmatrix} \right)$$

Abbildung 28: Berechnung der unbekannt Kräfte mit Maple

3.3.1.2 Resultat für statische Belastung

Da die radiale Normalspannkraft CZ im Vergleich zu den anderen Spannkraften Ax, BX und DX die größte ist, muss für den statischen Fall mind. diese Spannkraft mit Sicherheit von Drehfutter aufgebracht werden:

(Dabei berücksichtigt der Sicherheitsfaktor Sz die Zerspankraftschwankungen des Bearbeitungsprozesses und der Sicherheitsfaktor SSp die Spannkraftschwankungen des Drehfutters. Beide Werte sind mindestens nach VDI mit mind 1,5 anzusetzen. Außerdem wird, da bei der Einschätzung der Spannsituation Unsicherheit besteht, in den folgenden Rechnungen ein Sicherheitsfaktor $S_\mu \geq 1,3$ eingesetzt, der die Spannreibungsbeiwerte auf ca. 77 % reduziert. (VDI))

Bemerkung: Da im Ansatz der Berechnung die überbestimmten Kräfte BX und DX zunächst als NULL angenommen wurden und später jedoch in die Rechnung für die Haftbedingung eingeführt wurden, hat man in der Rechnung schon eine zusätzliche Sicherheit eingerechnet da diese Spannkraften zusätzlicher Halt in der Spannvorrichtung versprechen. (Die berechneten "grünen" Kräfte alleine könnten der Belastung durch die Zerspankräfte sowie einem durch das Gewicht aufgebrauchten Kippmoments schon stand halten, die erhöhte Haftreibung bietet eine "zusätzliche Sicherheit".)

$$F_{sp0zul} := S_z \cdot S_{Sp} \cdot S_\mu \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{d \cdot \mu} \left((d F_p - F_c d_c)^2 + (-2 m g a - d F_f + 2 F_c s - 2 F_c l_{sp} - F_f d_c + 2 m g l_{sp} + 2 F_p s - 2 F_p l_{sp})^2 \right)^{1/2}$$

Im Vergleich dazu die stark vereinfachte (unabhängig von den Vorschub und Passivkräfte sowie der Masse der Welle) Formel nach VDI (Gl.13):

$$F_{sp0VDIzul} := \left| S_z \cdot S_{Sp} \cdot S_\mu \cdot \frac{1.6 \cdot F_c \cdot d_c}{\mu \cdot d} \left(1 + \frac{s}{0.75 \cdot d_c} \right) \right|$$

3.3.1.3 Resultat für dynamische Belastung

Während der Drehfutterrotation unterliegen der Spannfutterkörper, die Spannbacken und das Werkstück den angreifenden Fliehkräften, was je nach Spannsituation und Drehzahl zu einer Schwankung der wirksamen Spannkraft führt. Besonders kritisch ist eine Spannkraftreduzierung, die bei Unterschreitung einer erforderlichen Mindestspannkraft zu einer unkontrollierten Freisetzung des Werkstücks führt. Um dies zu verhindern muss "die Spannbacke" zusätzlich den Betrag ihrer Zentrifugalkraft, die sie nach außen treibt (Backen sind außen gespannt)) entgegenwirken. (Nach VDI ist die Fliehkraft zu 100 % spannkraftmindernd anzusetzen.) Dabei gilt für die Zentrifugalkraft auf die Spannbacke:

$$F_{Fl} = \frac{m_{SB} \cdot v^2}{r} = m_{SB} \cdot r \cdot \omega^2 \quad \rightarrow \quad F_{Fl} := \frac{m_{SB} \cdot (d + 2 \cdot y_{SB}) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot (2 \pi \cdot n)^2$$

Die gesamte Spannkraft einer Backe ergibt sich dann unter Berücksichtigung der Sicherheiten zu:

$$F_{spmax} := S_{Sp} \cdot (S_z \cdot S_\mu \cdot F_{sp0max} + F_{Fl})$$

$$S_{Sp} \left(\frac{1}{2} \frac{1}{\mu} \left(S_z S_\mu \left(\frac{(d F_p - F_c d c)^2}{d^2} + \frac{(-2 m g a - d F f + 2 F_c s - 2 F_c l s p - F f d c + 2 m g l s p + 2 F_p s - 2 F_p l s p)^2}{d^2} \right)^{1/2} \right) + \frac{1}{500} m_{SB} (d + 2 y_{SB}) \pi^2 n^2 \right)$$

Im Vergleich dazu die nach VDI berechnete nötige Spannkraft (dynamisch):

$$F_{spmaxVDI} := S_{Sp} \cdot (S_z \cdot S_\mu \cdot F_{sp0maxVDI} + F_{Fl})$$

$$S_{Sp} \left(1.6 S_z S_\mu \left| \frac{F_c d c \left(1 + \frac{1.333333333 s}{d c} \right)}{d \mu} \right| + \frac{1}{500} m_{SB} (d + 2 y_{SB}) \pi^2 n^2 \right)$$

3.3.1.4 Bewertung der Sicherheit

Um die Spannsicherheit in Abhängigkeit von der Geometrie auszurechnen, müssen nun die Kenndaten von der jeweiligen Drehmaschine F_{Spwirk} mit dieser Spannkraft verglichen werden. Da wie schon erwähnt eine "zusätzliche Sicherheit" durch die in der Rechnung vernachlässigten Spannkraften BX und CX eingebracht wurde, und die nach VDI empfohlenen Sicherheitsfaktoren schon in die Rechnung miteinbezogen wurden, müsste meiner Bewertung zufolge eine Gesamt-Sicherheit S_{ges} , die das Verhältnis von der wirkenden Spannkraft der max. nötigen Spannkraft darstellt, von $S_{ges} = 1, 0$ ausreichen.:

$$S_{ges} := \frac{F_{Spwirk}}{F_{spmax}}$$

3.3.1.5 Resümee

Ein Zahlenbeispiel wurde berechnet um einen möglichen und realistischen Fall zu charakterisieren. Es hat gezeigt, wie sich die berechneten Werte nach VDI mit denen eigen berechneten Werten unterscheiden. Dadurch dass die Passiv und Vorschubkraft vernachlässigt sowie geometrische Vereinfachungen gemacht wurden, unterscheiden sich die beiden Sicherheiten wesentlich von einander. Die max. nötige Spannkraft nach der VDI ist verglichen mit der aus der neuen Betrachtung

berechneten, wesentlich höher (Sicherheit deshalb geringer). Somit ist der VDI-Ansatz konservativer also jedenfalls auf der sicheren Seite.

Da im Falle einer Fliegenden Fertigung von extrem großen Wellen (Turbinenwellen) jedoch die Maschinen an ihre Grenzen stoßen, lohnt es sich diese "Grenzen" genauer zu berechnen und dementsprechend die Nutzung zu optimieren. (Ansonsten würde man Wellen, die nach VDI-Berechnung nicht mehr fliegend auf der Maschine gefertigt werden dürfen, mit einer teuren Lünette stützen müssen, obwohl nach dieser genaueren Rechnung die "Fliegende Fertigung" noch möglich wäre).

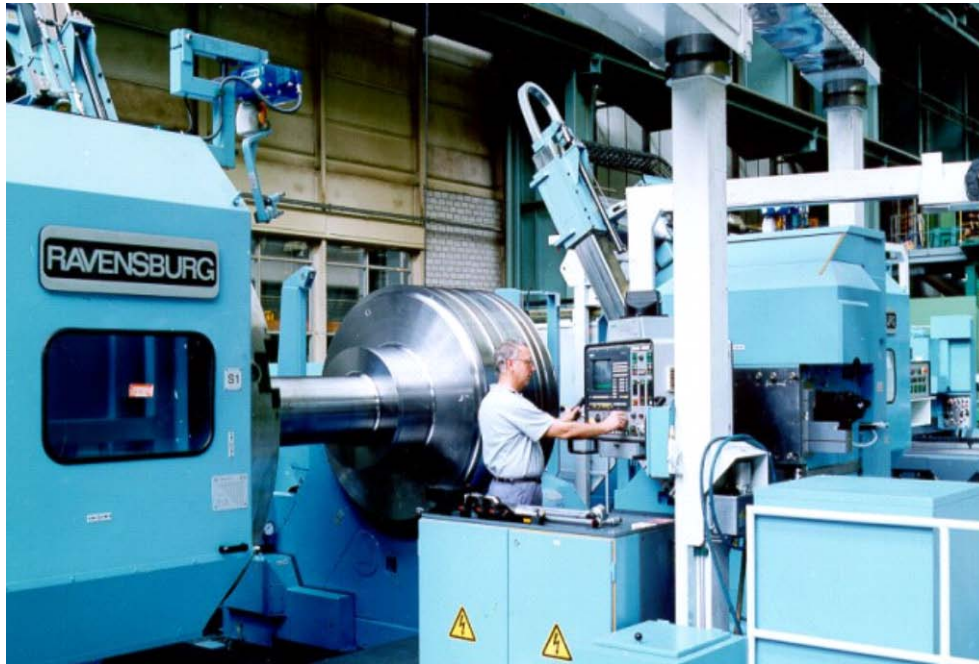


Abbildung 29: Drehen eines Turbinenwellenteils²¹

Unterschrift Betreuer:

J. Störkle

²¹ ([alsto3], 2010)

3.4 FP3 Instandhaltung, Wartung, Reparatur

3.4.1 Revisionskoordination (Kernkraftwerk Leibstadt KKL, CH)

Eine Kernkraftwerks-Revision ist eine gewaltige Aufgabe, auf die die Beschäftigten zum Teil das ganze Jahr drauf hin arbeiten. Ich war dort zur Unterstützung des Drywell Koordination Team angestellt und durfte die Revisionsarbeiten zum Teil auch direkt im Reaktorbereich koordinieren. Außerdem bekam ich kleine Hilfstätigkeiten sowie eine interessante Führung im gesamten Kraftwerk.

3.4.1.1 Beschreibung der Revision²²

Einmal im Jahr, meist im August/September, findet im Kernkraftwerk Leibstadt die Revision statt. Das Kernkraftwerk wird dabei überprüft und gewartet. Bei der Revision kommen zu den etwa 300 Beschäftigten noch knapp 1000 Spezialisten aus 200 Firmen, wie Elektriker, Physiker, Chemiker, Schlosser, Ingenieure, Strahlenschützer, Sicherheitsfachleute des TÜV und andere. Für die jährliche Revision gibt der Betreiber jeweils etwa 15 Millionen Euro aus. Jeder Tag, an dem das Kernkraftwerk keinen Strom produziert, kostet den Betreiber mehrere hunderttausend Euro. Die Revision kann, wenn größere Arbeiten anfallen, vier bis sechs Wochen dauern. Die bisher kürzeste Revision dauerte 15 Tage. Die Revision 2008 begann Anfang August 2008 und dauerte bis Ende September. Während des Stillstandes wurden alle üblichen Wartungsarbeiten an dem Reaktor, der Dampfturbine sowie an sämtlichen Komponenten wie Rohrleitungssystemen, Kesseln und Bauwerken durchgeführt.



Abbildung 30: Revision in Leibstadt: leeres Gehäuse der Niederdruck-Turbinen²³

²² ([kkl1], 2011)

Die jährliche Revision bedeutet für den Raum Leibstadt einen zusätzlichen Wirtschaftsfaktor. Für die Dauer der Revision müssen bis zu 1000 Personen verpflegt werden. Sie übernachten teilweise in den umliegenden Ortschaften. Für das zusätzliche Personal werden Container auf dem Betriebsgelände aufgestellt und die Werkskantine wird mit einem Zelt erweitert. Zudem wird der Sicherheitsdienst verstärkt.

Bei jeder Revision werden etwa 120 der 648 Brennelemente durch neue ersetzt. Zum Schutz vor der Strahlung findet diese Auswechslung komplett unter Wasser statt. Der Reaktordruckbehälter wird dazu oben geöffnet, der Bereich darüber geflutet und die Brennelemente entnommen. Das geschieht mit einer Lademaschine, die die senkrecht stehenden und etwa vier Meter langen Brennelemente heraushebt. Sie werden unter Wasser durch eine Schleuse zum benachbarten Abklingbecken befördert. Die ausgetauschten Brennelemente verbleiben dort noch mehrere Jahre, damit Radioaktivität und Nach-Wärmeentwicklung erheblich zurückgehen. Bei manchen Revisionen, wie zuletzt 2004, werden alle Brennelemente herausgenommen, um die Wände und Nähte des Reaktorbehälters gründlich zu überprüfen. Diese Aufgabe wird von einem mit einer Kamera ausgestatteten, ferngesteuerten Mini-U-Boot übernommen.

Die Revision erstreckt sich auch auf den nichtnuklearen Teil der Anlage. Bei der Revision 2006 wurde im Maschinenhaus der Generatorläufer, eine 204 Tonnen schwere Welle, ausgetauscht. Diese Arbeiten übernehmen Spezialisten, die auch in Kohle- und Gasturbinenkraftwerken im Einsatz sind, da es bei den Bauteilen, die den Strom erzeugen, wie dem Generator, kaum Unterschiede gibt.



Abbildung 31: Wasserbecken im Kernkraftwerk Leibstadt²⁴

²³ ([badzei1], 2011)

²⁴ ([beonat1], 2011)

Nach Abschluss aller Arbeiten wird der Reaktor wieder hochgefahren. Dieser komplexe Vorgang wird von der Warte aus gesteuert und dauert etwa 60 Stunden. Beim Hochfahren wird unter anderem die Stellung der Steuerstäbe zwischen den Brennelementen geregelt und damit die Stärke der nuklearen Kettenreaktion und die Reaktorleistung beeinflusst. Diese wird von 0 auf 100 Prozent hochgefahren und zwischendurch immer wieder kontrolliert. Der Reaktor wird zunächst auf 30 Prozent Leistung hochgefahren, und die Anlage wird mit dem Netz synchronisiert, sobald der Generatorläufer 1500 Umdrehungen pro Minute erreicht hat. Das Hochfahren wird vom SVTI und ENSI überwacht.

Im Monat August 2008 war die Anlage für den jährlichen Brennstoffwechsel und die Jahreshauptrevision abgestellt. Nachdem alle Arbeiten und die erforderlichen Funktionstests erfolgreich abgeschlossen waren, begann das Anfahren der Anlage am 28. August 2008. Am 30. August 2008 war das KKL wieder am Netz und Vollast wurde am 1. September 2008 erreicht

3.4.1.2 Koordinierung der Wartungsarbeiten am Reaktor

Da während der Revision in der relativ kurzen Zeit sehr viele Leute zum Teil gleichzeitig Arbeiten im umgebenden Bereich des Reaktors (Drywell) durchführen müssen bedarf es dafür eine transparente Planung.

Je nach Priorität, Reihenfolge und Umfang der einzelnen Wartungsarbeiten müssen unterschiedliche Facharbeiter und Spezialisten verschiedener Unternehmen in bestimmten Zeiträumen ihre Arbeiten durchführen. Das größte Problem dabei ist die Einhaltung der Sicherheitsvorschrift, die besagt, dass sich höchstens 50 Personen gleichzeitig im separierten Drywell (Reaktorbereich / Zone 3) aufhalten dürfen. Diese Regel wurde aus Sicherheits-, Strahlenschutz- und Fluchtgründen von der Kraftwerksleitung, dem Strahlenschutz und der Atomaufsichtsbehörde festgelegt.

Die wesentlichen Wartungsarbeiten bestanden aus zerstörungsfreien Werkstoffprüfungen an Rohrleitungen und sonstigen Komponenten (siehe hierzu auch Abschnitt 3.5 FP4 Messen, Prüfen, Qualitätskontrolle) sowie Austausch, Kontrolle oder Wartung von sicherheitsrelevanten Verschleißteilen wie spezielle Armaturen, Stoßbremsen und Ventile. Außerdem mussten befugte und speziell ausgebildete Personen vom Strahlenschutz die Arbeiten ständig beaufsichtigen und kontrollieren.

Zunächst wurde analysiert und in Tabellen übersichtlich dokumentiert welche Unternehmen in welchen Zeiträumen mit wie viel Personen in der betreffende Zone Arbeiten durchführen müssen. Anschließend haben wir uns in dem Team dazu entschieden, einen ständigen Wachposten im Eingangsbereich des Drywell-Bereichs einzuführen. Im Kraftwerk lässt sich jede Tür nur mit dem personenbezogenen Chip-Ausweis öffnen, auf welchem der Name, das Unternehmen, und die Befugnis notiert ist, und jeder Arbeiter muss deshalb immer diesen Ausweis mit sich führen. Wir hatten uns deshalb überlegt, eine große Ausweissammeltafel zu besorgen, um dort die Ausweise der Arbeiter, die in den Drywell Bereich gehen, abzulegen, um zu jedem Zeitpunkt zu wissen , welche Personen von welchen Unternehmen an welchen Arbeiten gerade im Reaktorbereich sind. Das heißt rund um die Uhr mussten Aushilfskräfte den betreffenden Eingang bewachen und nur die befugten

3.4.1.3 Kraftwerksführung – Unterstützung bei Wartungsarbeiten



Abbildung 34: Besuch im Drywell / Reaktorbereich

Neben den Tätigkeiten als Koordinator der Drywell-arbeiten durfte ich auch andere Teams bei ihren Wartungsarbeiten unterstützen. Unter anderem begleitete ich Revisions-Materialtransporte im Reaktorbereich, zum Teil sogar während des Betriebs unter höchsten Sicherheitsbestimmungen sowie unter Aufsicht von Fachleuten und montierte kleine Rohrleitungen im Bereich des Kühlturms.



Abbildung 35: Drywell Wasserpumpen Ventil

Um ein besseres Verständnis für die Siedewasserreakorteknik zu bekommen durfte ich an Führungen und Besichtigungen des Maschinenhauses und des Reaktorbeckens teilnehmen.

Unterschrift Betreuer: 

3.5 FP4 Messen, Prüfen, Qualitätskontrolle

3.5.1 Clearance-Boroskop Messung an einer Test-GT (ALSTOM, CH, Birr)

Der Luftspalt zwischen Gasturbinenschaufel und Gehäuse verändert sich während dem Betrieb (vor allem beim Hoch und Herunterfahren) einer Gasturbinenanlage und auch während der gesamten Lebensdauer einer Turbinenschaufel. Der Entwicklungsbereich der die Veränderungen der Spaltmaße während einem Lastzyklus untersucht, wird „Clearance“ genannt. Durch die hohen Betriebs-Temperaturen (thermische Dehnungen) und Schwingungen (mechanische Dehnungen) werden der gesamte Rotor und dessen Schaufeln verformt, und der Abstand zum Gehäuse wird dadurch deutlich geringer. Durch das Analysieren der Spaltmaße mittels Sensoren vor, während und nach dem Betrieb, können die jeweiligen Beanspruchungen ermittelt werden, bzw. mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Im laufenden Betrieb kann je nach Messort mit einem optischen oder induktiven Messsystem gemessen werden. Vor dem Hochfahren und nach dem Abkühlen bzw. auch zum Zwecke einer Jahresinspektion/ Revision kann mit einem Boroskop (ein Endoskop für Bohrlöcher, Arbeitskanäle oder Turbinengitter, bzw. allgemeine Technische Anwendungen wie Wartungsarbeiten, Instandhaltungsarbeiten und Reparaturen) ein 3D-Foto aufgenommen werden und anhand einer Bilderkennungs-Software die Spaltmaße gemessen werden.

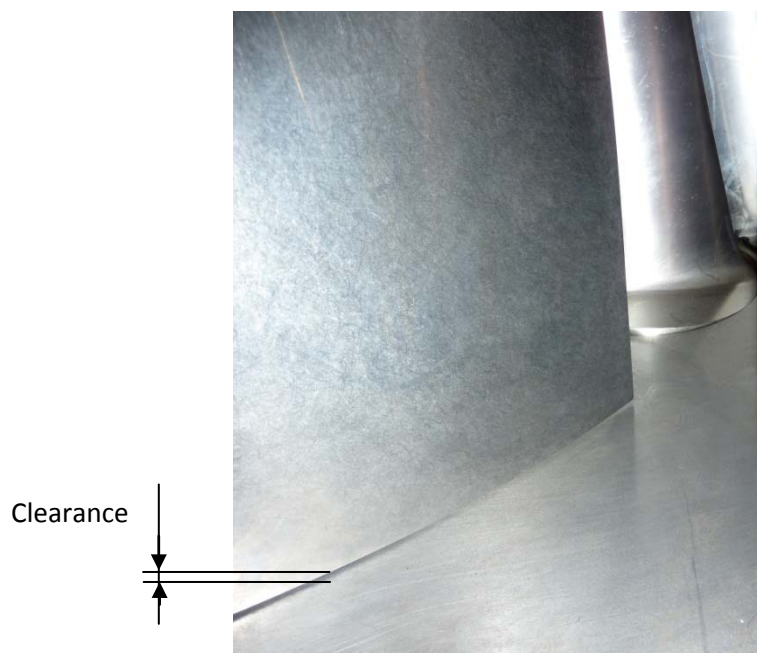


Abbildung 36: Luft-Spalt (Clearance) zwischen einer GT Schaufel und deren Gehäuse

3.5.1.1 Durchführung einer Clearance Boroskop Messung

Das Boroskop ist das absolute Optimum für Sachverständige, Turbinen-Wartungs- techniker und Entwicklungsingenieure. Das Boroskop ermöglicht nicht nur optische Einblicke in das Innenleben von Maschinen und Anlagen ohne diese vorher zu demontieren, darüber hinaus lassen sich Bilder und Video- Sequenzen der zu begutachtenden Bauteile direkt im Gerät abspeichern und später zum PC

übertragen. Es ist also das ideale Werkzeug für die Wartung und Instandhaltung in Industriebetrieben oder Werkstätten. Aufgrund des geringen Durchmessers des Messschlauches (6,0 mm) erlaubt es, in kleinste Bauteile vorzudringen. Das flexible Kabel wird durch eine Bohrung oder einen Hohlraum in die Nähe der zu betrachtenden Stelle geführt und sehen dabei kann alles auf dem Display angesehen und überwacht werden. Mit dem Joystick können die Kameraspitze in 2 Richtungen bewegt werden. Zur Dokumentation kann ein Video bzw. ein 3D Foto gemacht werden, welches im internen Speicher vom Boroskop abgelegt wird. Das Bild bzw. die Daten können anschließend auf einen PC übertragen werden sowie mit einer speziellen Software in ein 3D Bild projiziert werden, aus dem Informationen über Abmessungen und Abstände zusammen getragen und extrahiert werden können.



Abbildung 37: Boroskop²⁵ Messung an der-GT Anlage im ALSTOM-Testcenter in Birr

Durch die flexible Führung, das geringe Gewicht und die hervorragende Optik kann man mit dem Boroskop Schwachstellen und Problemstellen sehr leicht und früh erkennen und somit gezielt vorbeugende Maßnahmen ergreifen, ohne zunächst aufwendige Demontagen ausführen zu müssen. Vor allem die Dokumentation als Bild oder Video ermöglicht eine Vor-Nach-Beobachtung. Etwa, vor einem Umbau oder einer Reparatur, verglichen mit dem Zustand danach.

Unterschrift Betreuer: A. Khiminge

²⁵ ([ever1], 2011)

3.5.2 Werkstoffprüfung im Materialprüflabor (LB, CH, Baden)

Häufige Ursachen für Schadensfälle sind Werkstoffrisse und Materialfehler. Eine so große und leistungsfähige Maschine wie beispielsweise eine Gasturbine, wird in regelmäßigen Intervallen sogenannten Serviceinspektionen unterzogen um u.a. eventuelle Ermüdungsrisse rechtzeitig festzustellen. Ein Versagen der Bauteile könnte zum Freisetzen enormer Energien und Kräfte führen und fatale Folgen haben.

Zur Absicherung vor großen Schäden werden verschiedene Verfahren zur Entdeckung solcher Fehlstellen angewandt; im Folgenden ist eine Auswahl an zerstörungsfreien Prüfverfahren aufgelistet.

- Sichtkontrolle
- Farbeindringprüfung
- Wirbelstromprüfung
- Magnetpulverprüfung
- Ultraschalluntersuchung
- Röntgenuntersuchung

Im Rahmen meines Kurzpraktikums wurde ich mit drei der üblichen zerstörungsfreien Prüfverfahren vertraut gemacht und lernte außerdem noch Analysen im Bereich der zerstörenden Werkstoffprüfung, der Metallographie und des Zugversuchs und Kerbschlagbiegeversuch kennen.

Im Folgenden werden die grundlegenden Vorgehensweisen bei der Farbeindringprüfung, Magnetpulverprüfung sowie der Ultraschallprüfung beschrieben. Die Verfahren wurden hierbei an einem Schaufelträger durchgeführt.

3.5.2.1 ZfP Farbeindringprüfung

Das Farbeindringverfahren als Oberflächenprüfverfahren ist bei allen festen Körpern anwendbar, ohne dass deren übrigen physikalischen Eigenschaften eine Rolle spielen. Dieses Verfahren wird vorwiegend bei nicht magnetisierbaren Materialien angewendet, welche nicht porös und beständig gegenüber dem Medium sind. Es begründet sich darauf, dass (gefärbte) Flüssigkeiten mit niedriger Oberflächenspannung und damit niedriger Viskosität durch die Kapillareffekte auch sehr feine Trennungen an Oberflächen eindringen, wenn man sie lange genug einwirken lässt und diese Trennungen nicht durch Verunreinigungen verschlossen sind. Bringt man auf solche Stellen eine saugfähige Schicht auf, die auch noch einen guten Kontrast zum Eindringmittel liefert, so saugt diese Schicht das Eindringmittel an und macht somit Trennungen sichtbar.

Der Arbeitsablauf ist im Folgenden kurz beschrieben:

- Reinigen und Entfetten der Prüfstückoberfläche Aufbringen des Eindringmittels (z.B. rotes Mittel)
- Nach Eindringzeit (10 bis 30 min): Entfernung des an der Prüfstückoberfläche verbliebenen Eindringmittels durch vorsichtiges Abwaschen
- Aufbringen des Entwicklers (weiß): nach Abwarten der Entwicklungszeit (Minuten bis einige Stunden) zeigt das herausgesaugte Eindringmittel den Fehler an

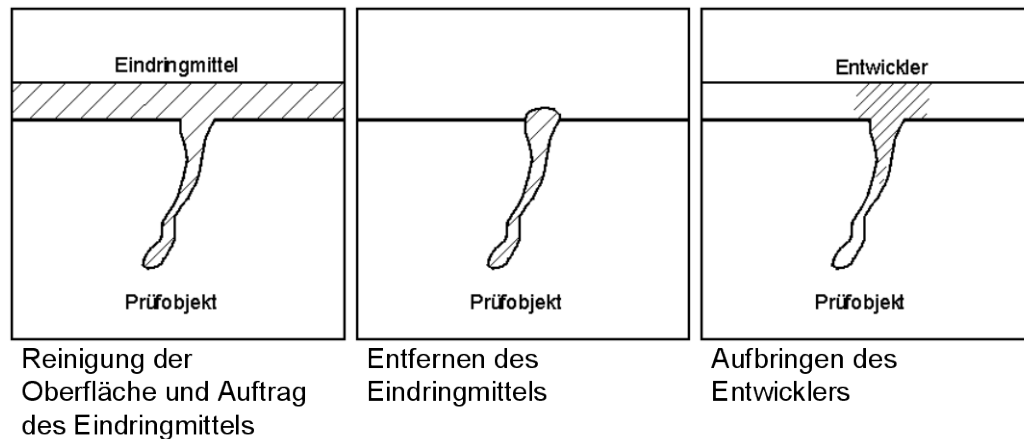


Abbildung 38: Schemaskizze der Farbeindring Prüfung

3.5.2.2 ZfP Magnetpulverprüfung

Als Oberflächenprüfverfahren für magnetisierbare Werkstoffe ist das Magnetpulververfahren besonders gut geeignet. Die theoretische Voraussetzung für dieses Verfahren liegt im großen Permeabilitätsunterschied zwischen Luft, die in den meisten Fällen als Füllmedium in Oberflächenfehlern vorliegen dürfte, und Eisen bzw. Stahl. Aufgrund dieses Unterschiedes werden in der Nähe von Oberflächen- bzw. oberflächennahen Fehlern magnetisierter Proben magnetische Streufelder gebildet.

In die Nähe solcher Streufelder gebrachte feinverteilte (pulverförmig oder flüssig) magnetisierbare Partikel werden dort festgehalten. Sorgt man dafür, dass solche Partikelansammlungen einen guten Kontrast (u. U. durch Benützung einer Kontrastfarbe, evtl. fluoreszierend) zur Werkstückoberfläche ergeben, sind damit Oberflächenfehler sichtbar zu machen. Voraussetzung dabei ist aber stets, dass das anzuwendende Magnetfeld eine zu den zu erwartenden Fehlern senkrechte Komponente aufweist. Dies ist jedoch stets leicht zu erreichen, indem man angepasste Magnetisierungsverfahren anwendet.

So verwendet man z.B. bei quer zu einem länglichen Prüfkörper verlaufenden Fehlern die Jochmagnetisierung oder die Magnetisierung mit einer Spule.

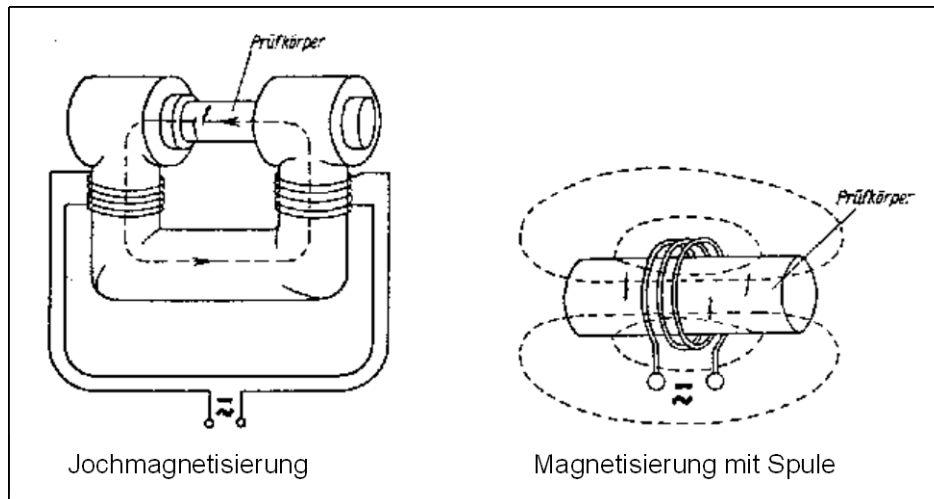


Abbildung 39: Magnetpulverprüfung für Querfehler²⁶

Bei längs verlaufenden Fehlern wird die sog. Selbstdurchflutung oder Hilfsdurchflutung angewendet. Dabei wird ein starker Strom entweder durch das Prüfstück oder einen im Prüfstück befindlichen Leiter geschickt, dessen jeweils zirkuläres Magnetfeld dann die geforderte Voraussetzung erfüllt. Zur Magnetpulverprüfung sollte die Oberflächenrauigkeit nicht zu stark sein.

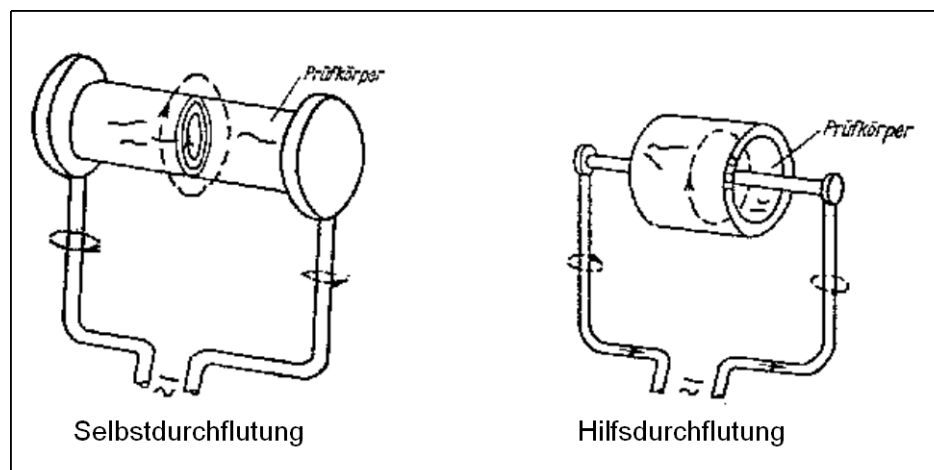


Abbildung 40: Magnetpulverprüfung für Längsfehler²⁷

3.5.2.3 ZfP Ultraschallprüfung

Die Ultraschallprüfung als zerstörungsfreies Prüfverfahren nutzt Schallwellen um Fehler aufzuspüren. Als Ultraschall werden Schallschwingungen mit einer Frequenz oberhalb der Grenze von 20kHz bezeichnet. Die Reflexion und Brechung von Ultraschallwellen an den Grenzflächen ist der ausgenutzte Effekt, die Werkstoffbereiche unterschiedlichen Schallwiderstandes trennen. Schallwellen sind in Festkörpern elastische Schwingungen und können dort als Longitudinal- (Ausbreitung in Fortpflanzungsrichtung) und Transversalschwingungen (Ausbreitung senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung) auftreten. In Gasen und Flüssigkeiten, die keine oder nur äußerst geringe

²⁶ ([mpa1], 2009)

²⁷ ([mpa1], 2009)

Schubkräfte übertragen können, sind Schallwellen stets Longitudinalwellen. Ein Fehler ist nur zu detektieren, wenn seine Querabmessung mindestens halb so groß ist wie die Schallwellenlänge. Je kleiner also die Fehlstelle ist, desto größer muss die Frequenz zur Auffindung derselben gewählt werden. Zusätzlich sind Schallwellen höherer Frequenz besser bündelbar, so dass eine Fehlerortung genauer erfolgen kann. Absorption und Streuung steigen mit der Frequenz, so dass Frequenzen über 6 MHz selten genutzt werden. Als besonderer Vorteil dieses Verfahrens ist das Aufspüren von Fehlern auch im Innern eines Bauteils hervorzuheben.

Die Ultraschallprüfverfahren werden in das Impulslaufzeitverfahren und Impulseechoverfahren eingeteilt. Bei der Rotoruntersuchung fand das Impulseechoverfahren Verwendung. Das Prinzip beruht darauf, dass der Schall an der Grenzfläche zweier Medien, entsprechend ihrer Schallwiderstände, reflektiert wird. Dazu wird die zu untersuchende Stelle mit einem Kopplungsmittel (hier Öl) bestrichen, welches eine Totalreflexion an der Grenzfläche Metall-Luft verhindern soll, die schon bei einem Abstand größer als 10-6 mm eintritt.

Der Schallkopf wird auf die Oberfläche aufgesetzt, wobei er kurze Schallimpulse aussendet. Während der Zeit zwischen den Impulsen arbeitet der Schallkopf als Empfänger. Die Ausgabe erfolgt auf einem Oszilloskop. Die Laufzeit auf der Abszissenachse des Reflektorgramms entspricht der Tiefenlage der Trennfläche, an welcher der Impuls reflektiert wird. Fehlerfreie Stellen liefern nur das Rückwandecho, beziehungsweise ein von der geometrischen Form abhängiges Echo. Liegt zwischen der Oberfläche und der Rückwand eine weitere Trennfläche, wird dies auf dem Oszilloskop als Zwischenecho/Fehlerecho sichtbar. Zu erkennen ist dies allerdings nur in Ausnahmefällen, wenn die Trennfläche annähernd senkrecht zum Schallstrahl ausgerichtet ist. Der Fehler lässt sich häufiger durch abgeschwächte beziehungsweise verschwindende Rückwandechos ausmachen. In solchen Fällen erfolgt die Prüfung derselben Stelle aus anderen Richtungen oder durch Schrägeinschallung mit einem Winkelprüfkopf.

3.5.2.4 Metallographie

Die Metallographie ist ein Arbeitsgebiet der Werkstoffkunde und bedeutet wörtlich Metallbeschreibung. Metallographen beschäftigen sich hauptsächlich mit der Mikrostruktur von Werkstoffen.

Bei poliertem Holz kann man bereits mit bloßem Auge die Maserungen erkennen, die dem Fachmann Rückschlüsse auf die Wachstumsbedingungen des Baumes erlauben (Temperatur, Regenmenge, Nährstoffangebot). Die Struktur eines Metalls kann man ebenfalls nach dem Polieren und der Behandlung mit speziellen Chemikalien erkennen, aber selten mit bloßem Auge (außer z.B. bei verzinkten Laternenmasten, Leitplanken).

Die Metallographin/der Metallograph erreicht dies, indem polierte und meist mit Säuren geätzte Metalloberflächen im Lichtmikroskop analysiert werden. Weitere Hilfsmittel sind u.a. Schleif- und Poliermaschinen, das Rasterelektronenmikroskop (REM), Geräte für die Werkstoffprüfung (z.B. der Härteprüfer) und natürlich der Computer für die digitale Bildauswertung und Bildarchivierung.

Es wird zwischen drei Hauptarten von Ätzungen unterschieden: Die Korngrenzen-, die Kornflächen- und die Kristallfigurenätzung.

- Korngrenzenätzung: Sie ist die gebräuchlichste aller Ätzungen. Es wird mit alkoholverdünnten Säuren kurz geätzt (Pikrinsäure + Salpetersäure).
- Kornflächenätzung: Es werden nur die Kornflächen durch das Ätzmittel angegriffen. Zu dieser Art von Ätzungen werden besondere Mischungen verwendet.
- Kristallfigurenätzung: Es wird ein sehr starkes Ätzmittel verwendet (konzentrierte Säuren).

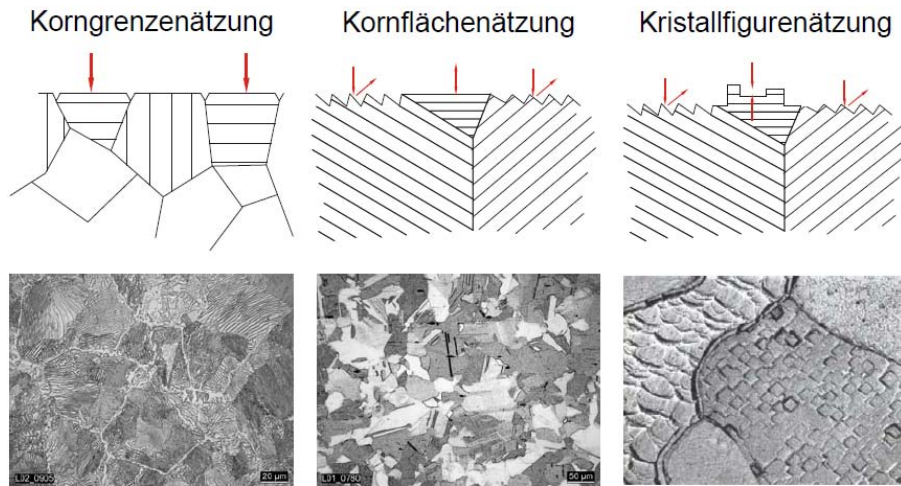


Abbildung 41: Metallographie, Ätzverfahren²⁸

²⁸ ([mpa2], 2011)

3.6 FP6 Fertigung, Montage

3.6.1 Herstellung von Turbolader Verdichterräder (ABB Turbo Systems, CH, Baden)

Die Bearbeitung vom Rohling bis zum fertigen Verdichterrad erfolgt bei der ABB Turbosystems AG heutzutage für kleine Verdichterräder mit hochmodernen fünfschigen CNC-Fräsmaschinen in nur einer Fräsaufspannung. Für größere Verdichterräder ergibt sich aufgrund der Handhabbarkeit und der sich wegen des Größeneinflusses einstellenden hohen Eigenspannungen beim Abschrecken ein anderer Fertigungsprozess. In der Fertigung durchlief ich die gesamte Fertigungsprozesskette mit den im Folgenden beschriebenen Tätigkeiten.

In der Fertigung wird zwischen großen und kleinen Verdichterräder differenziert. Im Folgenden soll der Produktionsprozess eines großen Verdichterrades (TPL77) vom Gießen bis zur Auslieferung beschrieben werden.

Einen Eindruck des ca. 60 cm großen Verdichterrades TPL77 soll in Abbildung 42 vermitteln werden.



Abbildung 42: Fertiges Verdichterrad TPL77

Der Gieß- und Schmiedeprozess der hochfesten Aluminiumknetlegierung, der im Folgenden kurz beschrieben ist, wird bei einem europäischen Unternehmen durchgeführt. Um Irritation zu vermeiden, sei hier nochmals ausdrücklich erwähnt, dass der Gieß- und Schmiedeprozess nicht Teil meines Praktikums war und nur deshalb beschrieben ist, um den Produktionsprozess vollständig zu erfassen.

3.6.1.1 Gießprozess

Beim Abgießen wird zur Vermeidung von Oxyd-Einschlüssen eine Doppelfiltrierung (z.B. ein Snif-Filter in Kombination mit einem Tiefbett-Filter oder eine adäquate Doppelfiltrierung) eingesetzt. Das Material wird in eine zylinderförmige Form gegossen. Vor der weiteren Verarbeitung wird das

Material bei erhöhter Temperatur homogenisiert. Vor oder nach dem Freiformschmieden wird das Material einer Ultraschall-Prüfung unterzogen. Diese Vorgaben dienen der Sicherstellung der in Umfangsrichtung verlangten Materialhomogenität.

3.6.1.2 Schmieden

Die Schmiedetechnologie ermöglicht, dass der Faserverlauf an die Beanspruchungsrichtung angepasst wird und somit die Werkstoffeigenschaften optimal ausgenutzt werden können. In der hochmodernen Schmiedeanlage des europäischen Unternehmens können sehr hohe Prozessdrücke gefahren werden, die zur Erreichung der geforderten Festigkeits- und Materialeigenschaften der Aluminiumknetlegierung benötigt werden.

Im Detail betrachtet wird der gegossene Rohling vor dem Schmieden spannungsfrei gegläht und langsam abgekühlt, um ein homogenes Ausgangsmaterial zu erhalten. Zuerst wird mittels dreiachsigen Freiformschmieden das Gussgefüge zerstört, um isotrope Materialeigenschaften zu bekommen. Die Erlangung von isotropen Materialeigenschaften bedeutet, dass die beim Gießen entstanden intermetallischen kettenförmigen Phasen durch das Freiformschmieden aufgebrochen werden. Danach erfolgt die Formgebung durch Gesenkschmieden. Der Rohling wird hierbei in eine Form, das so genannte Untergesenk, gelegt. Von oben fährt das Obergesenk (Schmiedepresse) auf das Werkstück und formt es zum gewünschten Fertigteil. Nach dem Schmiedevorgang muss im Allgemeinen noch der entstandene Grat entfernt werden. Die Gesenke bestehen aus warmfesten Stählen, in die Hohlräume eingearbeitet sind, deren Formen den späteren Fertigteilen entsprechen. Die Schmiedetemperatur liegt je nach Aluminiumlegierung bei etwa 300-400°C. Höhere Schmiedetemperaturen würden zwar den Umformprozess erleichtern, sind aber auf Grund der dann auftretenden Rekristallisation nicht erlaubt.

Nach dem Schmieden werden die Verdichterradrohlinge zur ABB nach Baden geliefert und nach der Fertigungsübersicht wie sie in Abbildung 43 zu sehen ist gefertigt. Anhand dieser Übersicht wird im Folgenden der Fertigungsprozess in der Fertigungslinie Rotoren beschrieben.

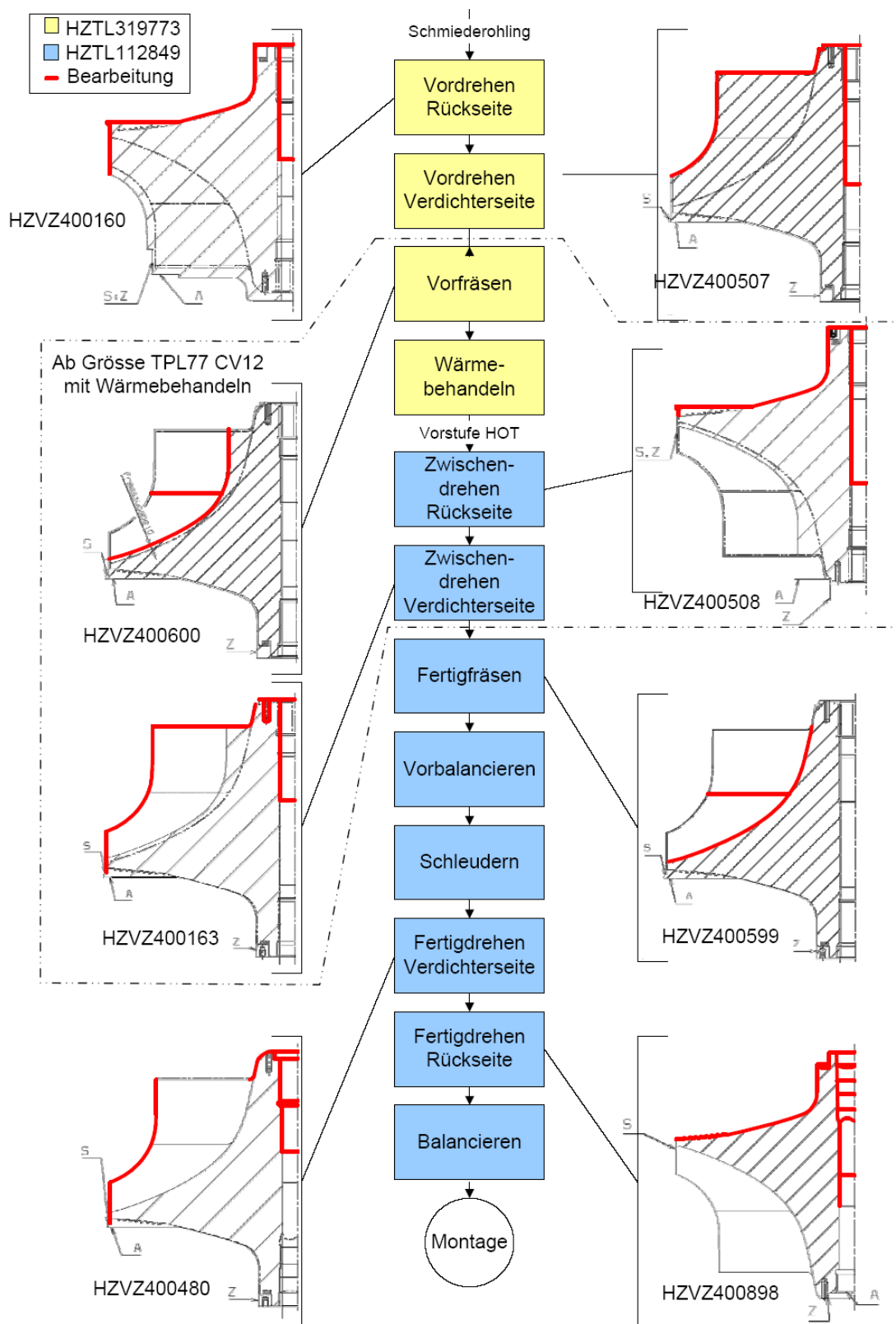


Abbildung 43: Fertigungsablauf beim Verdichterrad TPL77 CV12

3.6.1.3 Materialannahme

Bei der Materialannahme wird der Rohling auf dessen Ist-Zustand kontrolliert. Der Ist-Zustand eines Auftrages wird hierbei anhand einer Laufkarte auf die Anzahl und den optischen Zustand der

Rohlinge geprüft und anschließend protokolliert. Außerdem ist durch die Laufkarte der gesamte Produktionsablauf vorgegeben. Ein Auftrag kann einzelne Rohlinge oder auch mehrere Rohlinge beinhalten (siehe Abbildung 44).



Abbildung 44: Auftrag mit 20 kleinen Verdichterrohlingen

3.6.1.4 Vordrehen der Rückseite und der Verdichterseite

Da beim Gieß- und Schmiedeprozess des Rohlings die geforderte Maßgenauigkeit nicht so genau eingehalten werden kann, werden die Rohlinge beim Vordrehen auf ein gefordertes Maß reduziert. Der Rohling wird zuerst auf der Rückseite vorgedreht, um als Referenzseite für die Weiterbearbeitung verwendet werden zu können. Anschließend wird die Verdichterseite vorgedreht. Die einzelnen Fertigungsschritte können auch jeweils in Abbildung 43 an den mit dicken Linien hervorgehobene Kontur erkannt werden. In Abbildung 45 ist ein vorgedrehter TPL77-Rohling zu sehen.



Abbildung 45: Vorgedrehter TPL77-Rohling

3.6.1.5 Vorfräsen

Beim Vorfräsen wird die Wärmebehandlungskontur mittels Schruppen gefertigt (siehe Abbildung 46). Schruppen ist ein Arbeitsvorgang bei dem viel Material in einem Durchgang entfernt wird. Durch das Vorfräsen wird die grobe Kontur der Schaufeln erzielt. Das grobe Vorfräsen des Schaufelverlaufs ist für die Wärmebehandlung von entscheidender Bedeutung, da sich durch das Vorfräsen der Vergütungsquerschnitt verkleinert.



Abbildung 46: Vorgefrästes Verdichterrad TPL77 (Wärmebehandlungskontur)

Der Fräsprozess wird auf hochmodernen und automatisierten fünfachsigem CNC Fräsmaschinen durchgeführt. Die fünfachsigem Fräsmaschinen ermöglichen das Fräsen in einem Arbeitsgang (siehe Abbildung 47 links). Früher musste das Verdichterrad in zwei getrennten Teilen, Verdichter- und Vorschaltrad, gefertigt werden, weil die Technik noch nicht dazu in der Lage war, innerhalb von fünf Freiheitsgraden, die Raumachsen X, Y, Z und zwei Drehachsen B und C, zu fräsen. In Abbildung 47 ist auf der rechten Seite der zweite Teil eines zweiteiligen Verdichterrades zu sehen, das mit der alten Frässtrategie hergestellt wird.

3.6.1.6 Wärmebehandlung

Die Wärmebehandlung wird im Folgenden nur grob beschrieben, da dieses Thema nicht Bestandteil meiner Arbeit war.

Verdichterräder aus AlCuMgZi (A2618) werden wärmebehandelt, um für den Betrieb die geforderten Materialeigenschaften zu erreichen. Die Wärmebehandlung (WB) besteht aus dem Lösungsglühen, dem unmittelbar folgenden Abschrecken in kochendem Wasser, Abkühlen auf Raumtemperatur und dem abschließenden Warmauslagern.



Abbildung 47: Fünfachsigige CNC Fräsmaschine(links) und Vorschaltrad (rechts)

Während des Abschreckens erfolgt eine Teilplastifizierung des Materials infolge der hohen Temperaturgradienten, wodurch Eigenspannungen aufgebaut werden. Bei kleinen Verdichterrädern entstehen geringe Eigenspannungen, da die Temperaturgradienten und damit die Plastifizierung des Materials niedrig sind. Diese können bei der Fertigbearbeitung weitestgehend abgebaut werden. Mit der Zerspanung wird bei diesen Rädern erst nach der Wärmebehandlung des Rohlings begonnen, wodurch ausreichend Material entfernt wird und damit ein großer Teil der Eigenspannung abgebaut werden kann. Große Räder werden dagegen für die Wärmebehandlung vorbearbeitet. Bei der Vorbearbeitung werden die Schaufeln aus dem Rohling grob vorgefräst, wodurch der Vergütungsquerschnitt des Rohlings verringert wird. Damit werden auch im Radinneren ausreichend hohe Abschreckraten erreicht. Da nach der Wärmebehandlung nur ein kleiner Anteil des Materials abgespannt wird, lassen sich die beim Abschrecken entstehenden unerwünschten Eigenspannungen nur noch in geringem Masse abbauen.

3.6.1.7 Zwischendrehen der Verdichter- und Rückseite

Beim Zwischendrehen werden die Schaufelhöhe und die Bohrung auf Schleuderkontur gedreht. An der Rückseite wird ebenfalls nochmals Material weggedreht, um auf die Schleuderkontur zu gelangen. Außerdem werden die für das Balancieren notwendigen Bohrungen in den „Kopf“ des Verdichterrades (Verdichtereintritt siehe Abbildung 48) gebohrt und anschließend mit einem Innengewinde versehen.

3.6.1.8 Fertigfräsen

Beim Fertigfräsen wird der Strömungskanal auf seine endgültige Form gefräst. Dieser Prozess erfolgt mit CNC-Maschinen, die auf das Hundertstel genau arbeiten. Wichtig bei diesem Vorgang ist, dass Drehzahl und Vorschub perfekt miteinander im Einklang stehen.

3.6.1.9 Vorbalancieren

Damit die Verdichterräder beim Schleudern keine zu große Unwucht aufweisen wird das Verdichterrad auf der Balancieranlage ausbalanciert (siehe Abbildung 57). Das Balancieren wird in zwei Balancierebenen vorgenommen. Die eine Balancierebene befindet sich im Bereich des Verdichtereintrittes (siehe Abbildung 49). In diesem Bereich wird das Balancieren mittels Schrauben durchgeführt, welches die Massenverteilung verändert. Die so genannten Madenschrauben weisen keinen Kopf auf und sind mit einem Imbuseinsatz versehen. Madenschrauben gibt es in jeder erdenklichen Größe bzw. Länge und sind deshalb auch bis auf das 10tel-Gramm genau abgestuft. Damit sich die Madenschrauben nicht während des Schleuderns lösen, sind diese mit Locktite verklebt.



Abbildung 48: Bohrlöcher mit Innengewinde für das Balancieren

Die andere Balancierebene befindet sich im Bereich des Verdichteraustrittes (siehe Abbildung 49). In dieser Ebene wird die Massenverteilung durch das Abtragen von Material gesteuert.

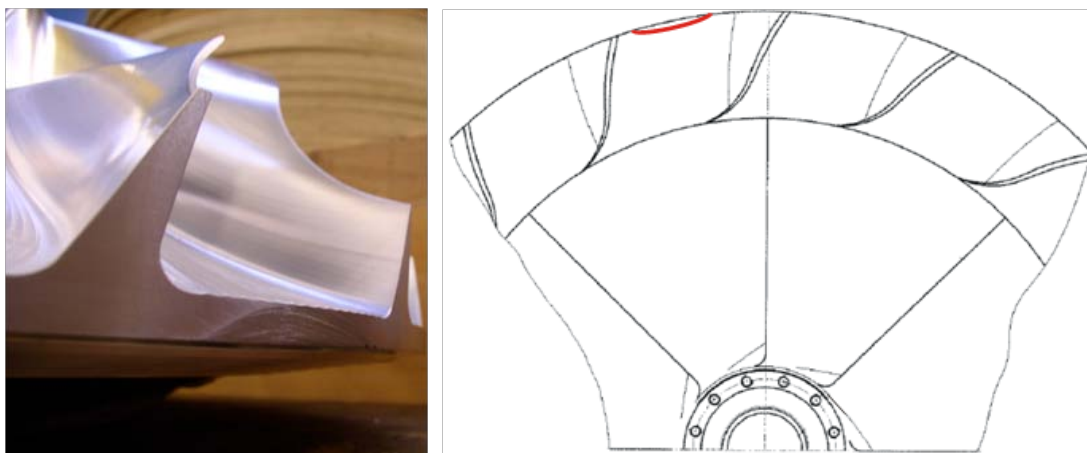


Abbildung 49: Balancierebene im Bereich des Verdichteraustritts

3.6.1.10 Schleudern

Ziel des Schleudervorgangs ist es, Druckvorspannungen im Bereich der Nabe des Verdichterrades gezielt aufzubauen. Dies wird durch eine Teilplastifizierung entlang der Nabenbohrung, infolge kurzzeitiger hoher Fliehkraftbelastung beim Schleudern erreicht. Die Teilplastifizierung entlang der Nabenbohrung wird dadurch erreicht, indem mit einer gegenüber dem Betrieb erhöhten Drehzahl geschleudert wird. Die Schleudervorspannungen erlauben später im Betrieb des Turboladers höhere zulässige Verdichterdrehzahlen, da die eingebrachten Druckvorspannungen den Betriebszugbeanspruchungen entgegenwirken.

Die bestimmenden Kenndaten einer Schleudieranlage sind die maximal erreichbare Drehzahl, die maximale Rotorabmessung sowie die maximal zulässige Rotormasse. Um Leistungs- und Wärmeprobleme durch die Ventilationsleistung bei beschauften Rotoren zu umgehen, werden die Rotoren unter Vakuum geschleudert. Da es beim Schleudern auch gelegentlich zu Havarien kommen kann, ist der Berstschutz ein weiterer wichtiger Aspekt. Der Berstschutz umfasst einen Sicherheitsbehälter, in dem vier dicke Stahlringe integriert sind und außerdem ist die Schleudieranlage noch durch einen extra abgetrennten Raum mit Betonwänden gesichert (siehe Abbildung 50).

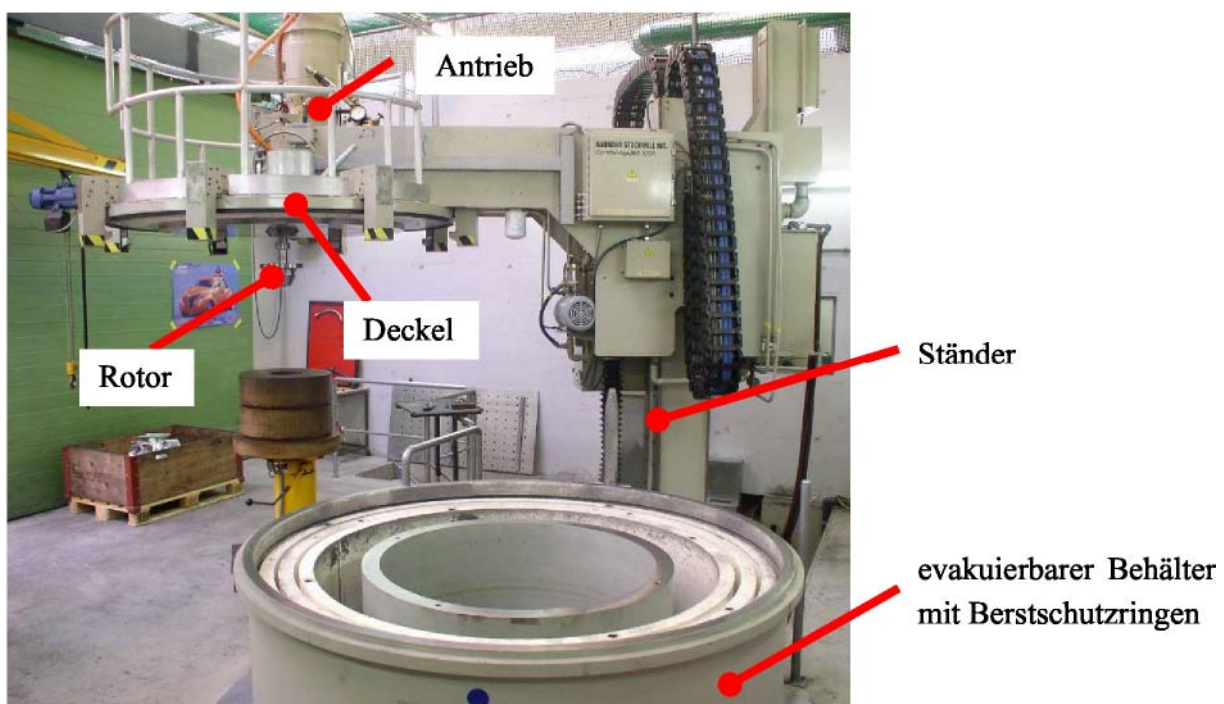


Abbildung 50: Schleudereinrichtung Barbour-Stockwell (USA): Behälter mit Berstschutzringen

Das zu schleudernde Verdichterrad hängt an einer Kupplung unterhalb des Deckels, der zur besseren Montage und Demontage des Verdichterrades schwenkbar ausgeführt ist. Die Antriebseinheit mit Motor und Getriebe befinden sich auf dem Deckel. Der Deckel wird mit dem angeflanschten Rotor auf den Behälter abgelassen, verriegelt und anschließend evakuiert.

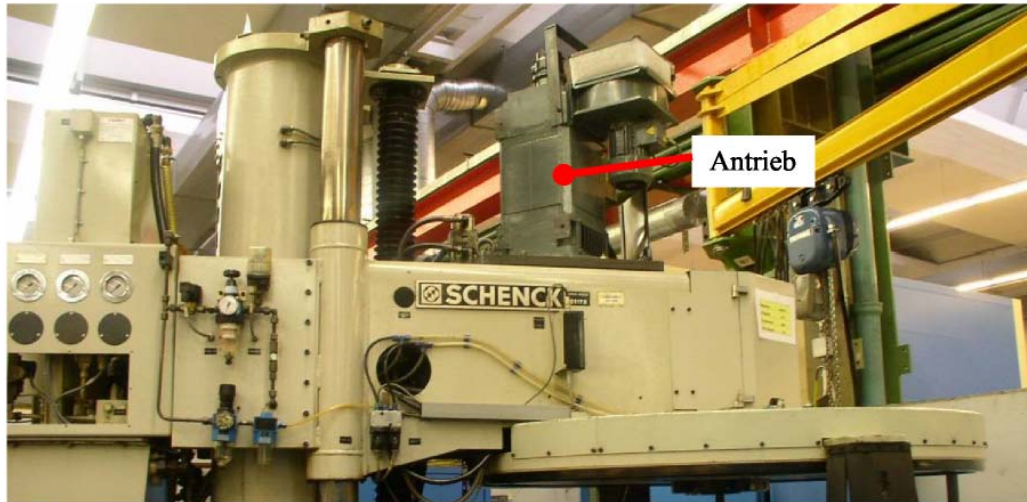


Abbildung 51: Schleudieranlage Schenck BI4U: Deckel mit Antriebseinheit

In Abbildung 52 ist der Aufbau der eigentlichen Antriebswelle der BI4U mit Planetengetriebe dargestellt. Beim Getriebe handelt es sich in diesem Fall um ein Planetenradgetriebe. Vom Motor wird das Hohlrad angetrieben, welches über die Planetenräder das Sonnenrad antreibt. Das in axialer und radialer Richtung gelagerte Hohlrad ist Teil der Abtriebswelle, die als Hohlwelle ausgeführt ist. Durch diese Hohlwelle läuft die eigentliche Antriebswelle, die am oberen Ende mit der Hohlwelle verbunden ist. Das zu schleudernde Verdichterrad, der sich am unteren Ende der Antriebswelle befindet, wird am Kupplungsstück befestigt. Die Antriebswelle „hängt“ frei in der Abtriebswelle des Planetengetriebes und wird durch ein hydrodynamisches Gleitlager gedämpft. Zur Sicherheit befindet sich um die Kupplung ein Fanglager, das bei einer Havarie das Dämpfungslager schützen soll. Der Aufbau mit einer schlanken, freien Welle ergibt eine elastische Aufhängung des Systems Antriebswelle-Aufnahme-Verdichterrad mit geringer Wellenfedersteifigkeit. Die Eigenfrequenz ω des Systems, die von der Wellenfedersteifigkeit abhängt, wird ebenfalls klein, wodurch gewährleistet wird, dass die Prüfdrehzahl immer im überkritischen Bereich liegt.

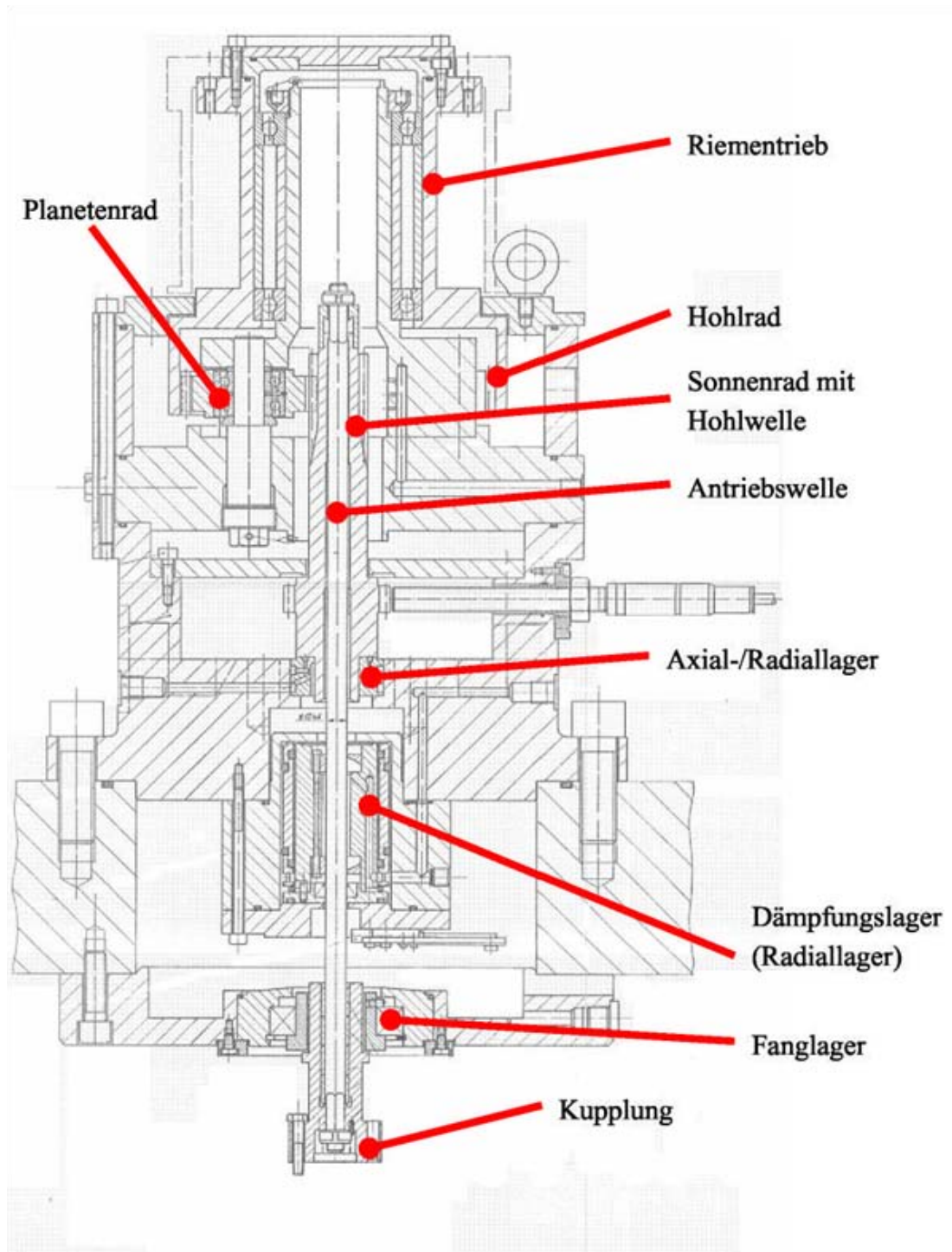
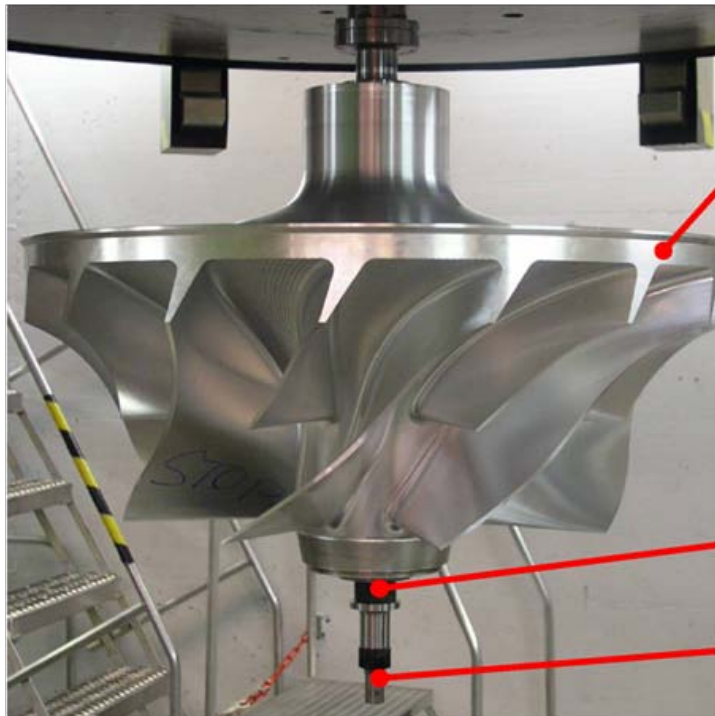


Abbildung 52: Aufbau Getriebe und Antriebswelle Schleudranlage Schenk BI4U

Durch die verwendeten Schleuderdorne können die Verdichterräder axial gespannt werden. Dabei ist zu beachten, dass beim Schleudern nicht nur eine radiale Aufweitung der Verdichterräder auftritt, sondern auch eine axiale Verkürzung. Diese axiale Verkürzung wird vom Schleuderdorn ausgeglichen. Hierzu werden Tellerfedersäulen verwendet, die sicherstellen, dass bei maximaler Drehzahl genügend Spannkraft vorhanden ist, um das Beschleunigungsmoment zu übertragen.



Verdichterrad

Tellerfedern

Schleuderdorn

Abbildung 53: Eingespanntes Verdichterrad

Während bei den TPL - Verdichterrädern die radiale Aufweitung im Innern die Verbindung Dorn- und Verdichterrad nicht beeinflusst und es somit genügt, die axiale Verkürzung auszugleichen (siehe Abbildung 54), muss bei den VTR - Verdichterrädern zusätzlich die radiale Aufweitung, die an der Schnittstelle Dorn-Verdichterrad auftritt über einen Konus ausgeglichen werden (siehe Abbildung 55). Aus diesem Grund ist bei den Schleuderdornen für die VTR - Räder eine größere Anzahl an Tellerfedern nötig, um die erforderliche Spannkraft zu gewährleisten.

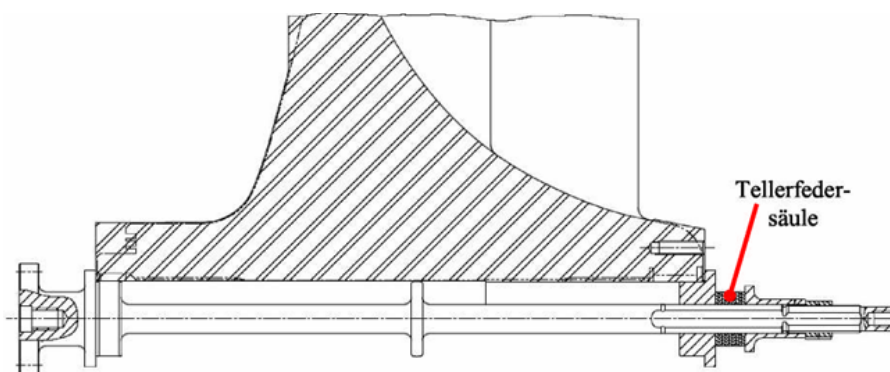


Abbildung 54: auf Schleuderdorn aufgespanntes TPL - Verdichterrad

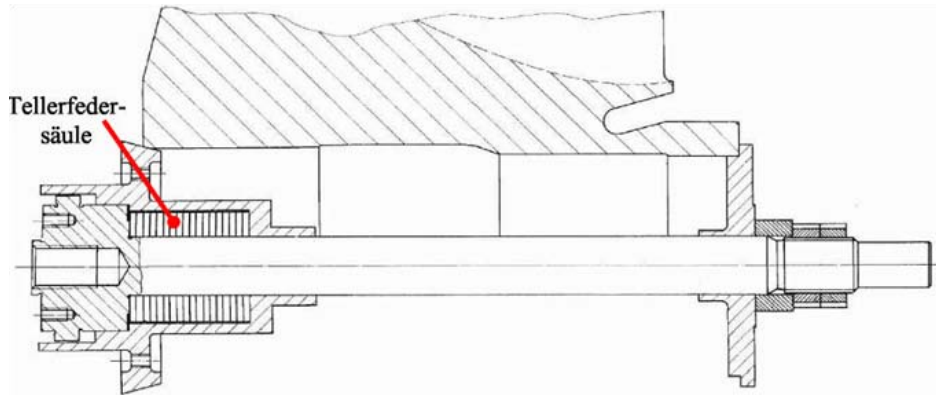


Abbildung 55: auf Schleuderdorn aufgespanntes VTR – Verdichterrad

Neben diesen beiden vorgestellten Aufnahmekonzepten werden noch verschiedene andere Varianten eingesetzt. Dabei handelt es sich teilweise um alte Konzepte, die noch nicht umgestellt wurden, teilweise aber auch um Individuallösungen. Diese sind erforderlich da es bei manchen VDR mit den herkömmlichen Dornen Probleme beim Schleudern gibt und somit eine spezielle Dornkonstruktion nötig ist.

Nach dem Schleudervorgang werden die Verdichterräder auf die Fertigungskontur gedreht.

3.6.1.11 Fertigdrehen der Verdichter- und Rückseite

Auf der Verdichterseite werden hierzu die Schaufeln auf ihr Endmaß (Höhe) mit einem geringen Vorschub, ausgehend vom Verdichterradeintritt zum Austritt, gedreht. An der Rückwand wird das Verdichterrad ebenfalls auf Betriebskontur gedreht. Außerdem muss aufgrund der Schleuderaufweitung und einer notwendigen Verbindung zwischen Verdichterrad und Welle die Bohrung nachbearbeitet werden. Die Verbindung zwischen Verdichterrad und Welle kann zum Einen durch ein Polygon (siehe Abbildung 56), das auf der Verdichteraustrittsseite in die Bohrung gefräst und anschließend bei der Montage auf die Welle mit einem ebenfalls polygonförmigen Gegenstück gepresst wird, erreicht werden. Mit dieser Verbindung kann sowohl Formschluss als auch Kraftschluss hergestellt werden. Diese Verbindungsvariante eignet sich besonders für große Verdichterräder, weil dort sehr hohe Betriebsbeanspruchungen auftreten.

Schrumpfen wird durch lokale Erwärmung des Verdichterrades und anschließender Aufschiebung der Welle erreicht.

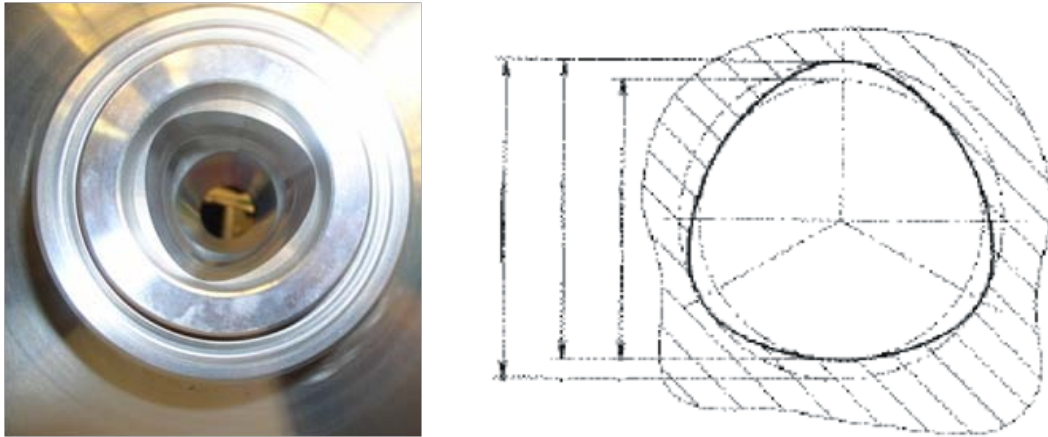


Abbildung 56: Polygon Wellen-Narbenverbindung zwischen Verdichterrad & Welle

Eine andere Möglichkeit der Verbindungen zwischen Verdichterrad und Welle besteht in der Verschraubung der beiden Komponenten. Eine dritte Variante besteht in der Aufschraubung des Verdichterrades auf eine runde Welle. Das Schrumpfen wird durch lokale Erwärmung des Verdichterrades und anschließender Aufschiebung der Welle erreicht.

Bei der manuellen Nachbearbeitung werden entstandene Grate entfernt und eine Sichtkontrolle vorgenommen. Anschließend wird das Verdichterrad mit einer MP-Nummer, Typenbezeichnung und dem ABB-Logo mittels Laseranlage beschriftet.

3.6.1.12 Balancieren

Da nach dem Voralancieren nochmals Material entfernt worden ist, ist es notwendig das Verdichterrad ein erneutes Mal zu balancieren (siehe Abbildung 57). Dies wird auf dieselbe Art und Weise durchgeführt wie beim voralancieren.

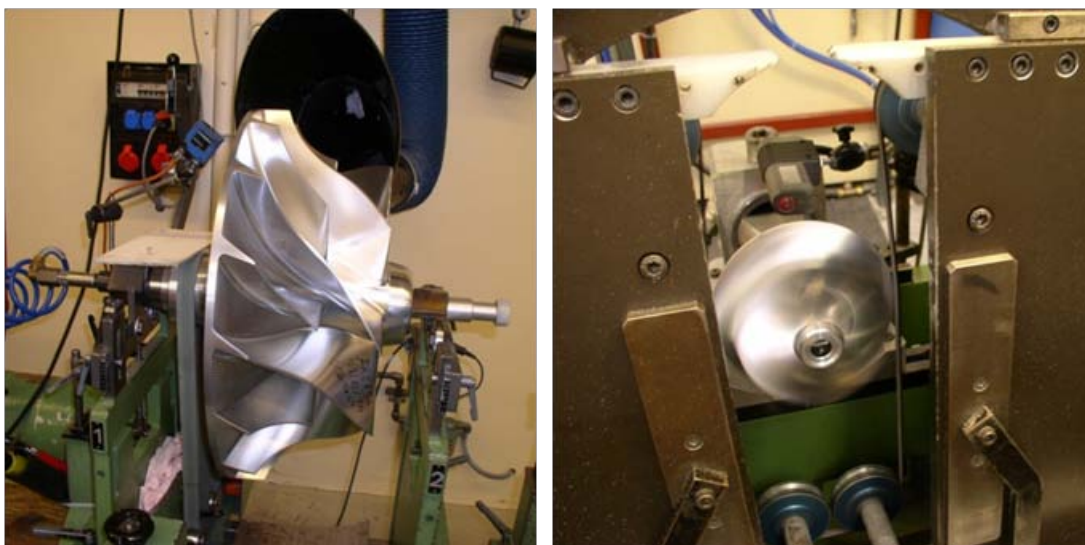


Abbildung 57: Balancieranlage

3.6.1.13 Ablieferung

Entweder werden die Verdichterräder in die Montage zum Zusammenbau der verschiedenen Turboladerkomponenten, in die Servicestelle, oder als Prototyp zu Versuchszwecken ausgeliefert.

3.6.1.14 Betrieb von Verdichterrädern

Die Belastung des Turboladers ist je nach Einsatz unterschiedlich. Sie kann, wie bei Transportschiffen, über lange Zeit konstant sein oder wie bei Eisbrechern durch häufiges Wechseln zwischen Vor- und Rückwärtsfahren, sehr stark variieren. Die unterschiedlichen thermischen und mechanischen Belastungen werden bei Betriebsfestigkeitsrechnungen berücksichtigt. Mit diesen Rechnungen wird die Lebensdauer eines Verdichterrades beziehungsweise die zulässigen Betriebszeiten bestimmt.



Abbildung 58: Fertiger TPL77 Turbolader

Unterschrift Betreuer: 

3.7 FP7 Fabrik- und Fertigungsplanung

3.7.1 Arbeitsvorbereitung in der Herstellung von GT und DT (ALSTOM, CH, Birr)

Für die Herstellung von geschmiedeten High-Tech Turbinen-Rotoren aus Hochtemperatur-Spezial-Legierungen und in der Größenordnung 15m lang, 3m Durchmesser und bis zu 40t schwer, welche präzisionsgenau gefertigt werden müssen, erweist sich als äußerst heikel und kompliziert. Um den kompletten Produktionsprozess des Rotors, des wichtigsten Teils der Turbinenanlage, von der Anlieferung über das Schweißen der Wellenteile, der Wärmebehandlung, der Spanenden Bearbeitung bis hin zur Beschauelung und Ablieferung in den Griff zu bekommen, bedarf es einer gut organisierten und strukturierten Fertigungsplanung. In meinem Praktikum und Ferienjob, durfte ich in dieser Abteilung zunächst einmal die Arbeitsabläufe und Strukturen verstehen lernen und anschließend Tools entwickeln, die hilfreich für die Organisation der Mitarbeiter und deren Aufgaben/ Projekte sind. Als zweite Aufgabe war ich an der Entwicklung eines interaktiven Checklisten-Tools beteiligt, welches eine Hilfestellung bei der Erstellung von Arbeitspapieren/ Fertigungsanweisungen leisten sollte.

3.7.1.1 Entwicklung eines Arbeitsplanungstool für Mitarbeiter der Arbeitsvorbereitung

Das Produktionsplanungsteam ist intern nochmal in 3 Bereiche gegliedert:

- 1) CNC-Programmierung (PRO) [ca. 5 Mitarbeiter]
- 2) Betriebsmittelkonstruktion (BMK) [ca. 6 Mitarbeiter]
- 3) Fertigungsplanung (FPL) [ca. 3 Mitarbeiter]

Die Anforderungen an das Mitarbeiterplanungstool wurden zunächst nicht klar definiert, sondern vielmehr sollte ich die Arbeitsabläufe in der Abteilung kennenlernen und anschließend eine mögliche Programmtechnische Umsetzung formulieren. Die resultierenden Anforderungen wurden dann folgendermaßen von mir festgelegt:

- Jede Tätigkeit (Bezeichnung, Zeitraum Dauer und weitere Eigenschaften) eines Mitarbeiters aus einem der 3 Bereiche soll in einer Übersicht dokumentiert werden, sodass diese übersichtlich geplant und nachvollzogen werden kann.
- Es muss zwischen projektbezogenen (z.B. Erstellen eines CNC Programm für eine kundenspezifische Dampfturbine) und nicht projektbezogenen Tätigkeiten (z.B. Anpassungskonstruktion eines Fräskopfs zur Verbesserung der Standzeiten) unterschieden werden.
- Die alle projektbezogenen Tätigkeiten aller Mitarbeiter müssen projektspezifisch in einer Gesamtübersicht betrachtet werden können.
- Die Übersicht soll ein transparentes Aushängeschild der Zuständigkeit und Fähigkeiten es Mitarbeiters sein.

- Gleiche bereichsübergreifende Tätigkeiten wie Schulungen, Besprechungen oder Verbesserungsprojekte sollen einheitlich gegliedert sein.
- Das Tool soll in Microsoft Excel programmiert werden da viele übersichtliche und vorgefertigte Funktionen und Komponenten wie Tabellen, und Formatierungen verwendet werden können

Durch diese Anforderungen und durch die Analyse der gewohnten Mitarbeitertätigkeiten wurde die folgende Gliederungsstruktur der Tätigkeiten eines Mitarbeiters aus einem der drei Bereiche festgelegt:

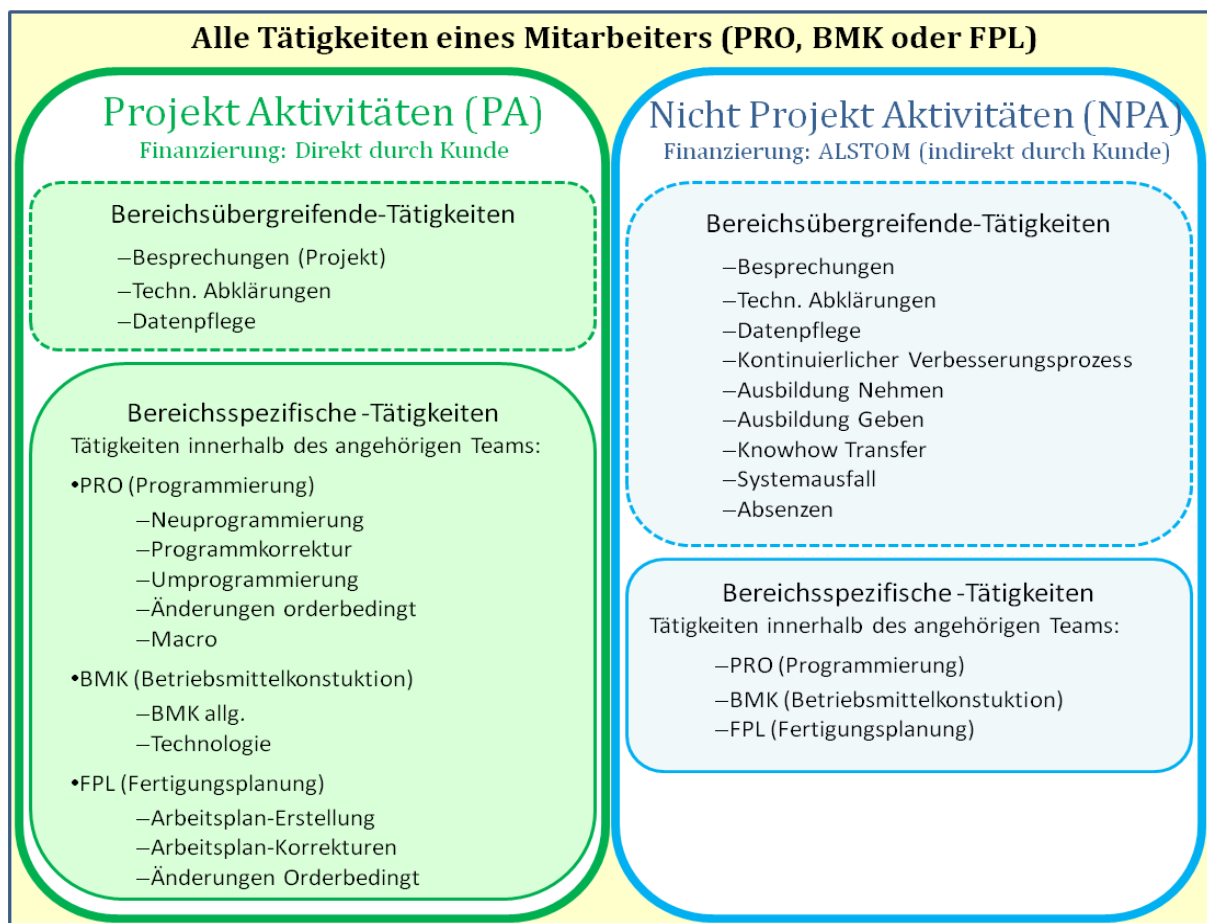


Abbildung 59: Gliederung der Tätigkeiten eines Mitarbeiters in der Arbeitsvorbereitung

Alle Projekt Aktivitäten muss man im Nachhinein noch einem Projekt (z.B. Fertigung der 3 Niederdruck Dampfturbinenrotoren für das Kernkraftwerk Leibstadt KKL) zuordnen können. Deshalb muss es eine Datenbank (Anlagenspeicher) geben, welcher jedes Projekt /Anlage für jeden Mitarbeiter zugänglich angelegt und zum Buchen abgerufen werden kann. Die schnellste und einfachste Umsetzung dessen wurde wie folgt realisiert:

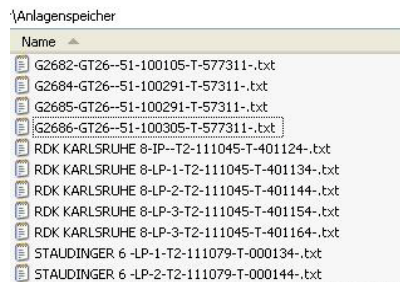
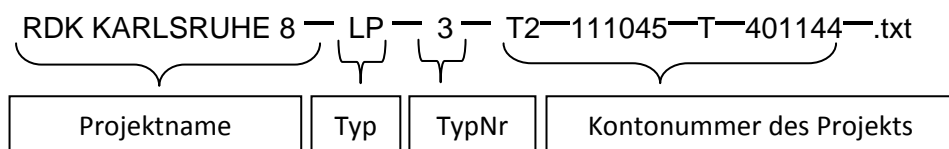


Abbildung 60: Projektbeispiele für den Netzwerkordner Anlagenspeicher

Im Firmen-Netzwerk wurde ein Ordner „Anlagenspeicher“ erstellt, der alle aktuellen Projekte vom aktuellen Jahr beinhaltet, bzw. jeder Mitarbeiter kann neue Projekte anlegen, die dort gespeichert werden. Jedes Projekt liegt als Datei mit der Endung *.txt vor. Will man nun an einem neuen Projekt arbeiten, welches noch nicht gespeichert, so gibt man den Projektname und die Projekteigenschaften an, welche im erstellten Dateinamen gespeichert werden (Die Datei an sich hat bis auf ihren Namen keinen Inhalt). Der Dateinamen setzt sich aus folgenden Informationen zusammen:



Durch die Bindestriche können die unterschiedlichen Projekteigenschaften in der Reihenfolge unterschieden werden. Jede Projekt-Tätigkeit muss die Bezeichnung gemäß dem Schema in Abbildung 61 enthalten um später wieder mit dem Projekt in Verbindung gebracht werden zu können.

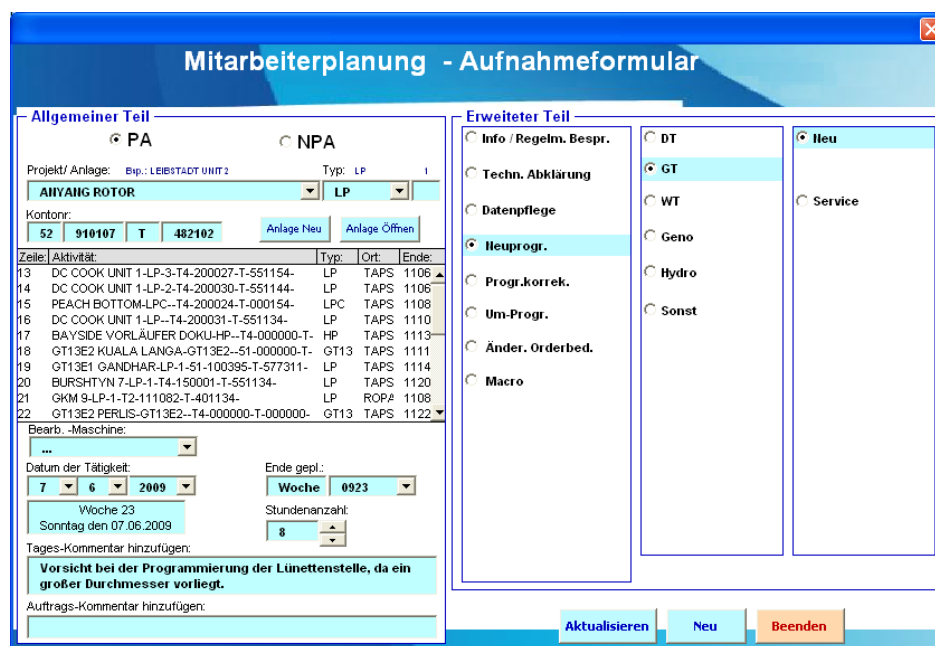


Abbildung 62: GUI zur bedienerfreundlichen Eintragung der Tätigkeiten eines Mitarbeiters

Um diese gesamten Anforderungen Regeln und Strukturen anwenderfreundlich anwenden zu können, wurde eine Übersichtliche Excel-Tabelle gestalten, die zum Eintragen von Tätigkeiten ein Graphical User-Interface (GUI) (Abbildung 62) besitzt. Jeder Mitarbeiter hat nun eine eigene Tabelle aber der erstellten Vorlage und kann somit seine eingen Tätigkeiten individuell eintragen und planen. Die Projektbezeichnungen können mittels Graphical User-Interface (GUI) direkt erstellt oder aus dem Analgenspeicher-Ordner abgefrufen werden.

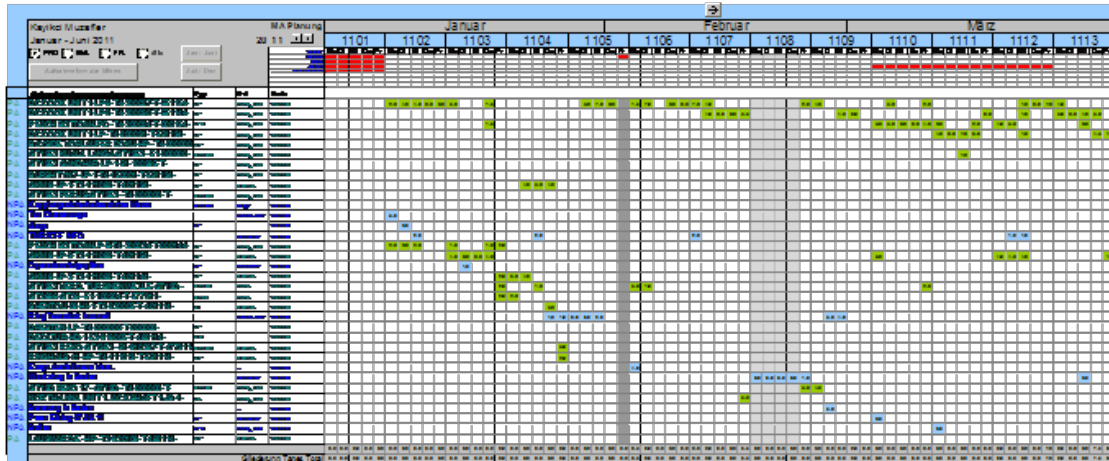


Abbildung 63: Übersicht der eingetragenen Tätigkeiten eines Mitarbeiters

Für die Gesamtauswertung aller Tätigkeiten aller Mitarbeiter, sowie einer Auswertung der Projektaufwendungen (benötigten Projekt-Stunden) wurde eine weitere Datei erstellt, die mit Hilfe eines VBA-Makros alle nötigen Tätikeitsinformationen aus den einzelnen Mitarbeiterdateien zieht, und diese sortiert, zusammenfasst und in Diagrammen darstellt.

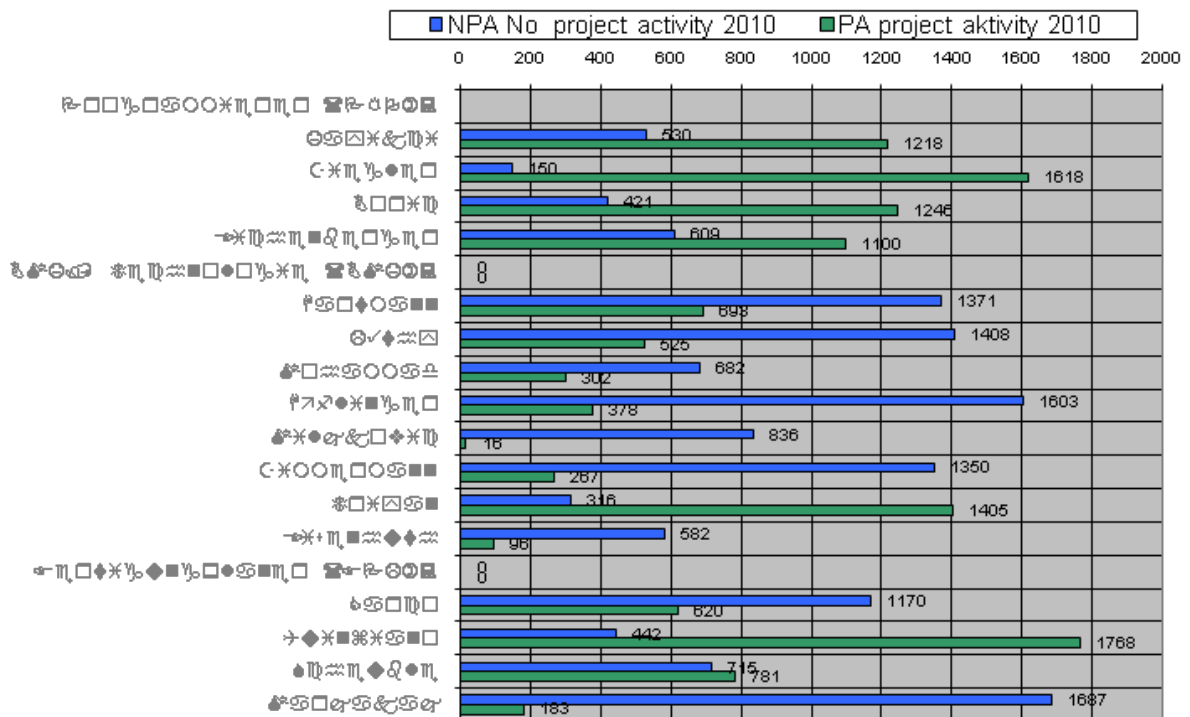


Abbildung 64: Übersicht der PA und NPA-Anteile aller Mitarbeiter

Abbildung 66: Erster Entwurf des Checklistentools mit VBA in Excel 2000

Ein Jahr später wurde dieses Projekt wieder aufgenommen und in einer Access 2007-Datenbank (mit Access 2003 kompatiblen Datenbank) mit Hilfe von verknüpften Tabellen, Beziehungen und Formularen weitgehend völlig neu umgesetzt. Dabei konnten auf fertige Access Funktionen wie das definieren von Beziehungen (Abbildung 68) und Erstellen von verknüpften Formularen verwendet werden. Außerdem kann die Datenstruktur durch objektorientierte VBA-Programmierung (ADO-DB Objekte) während der Laufzeit angepasst und verändert werden.

Da sich jedoch die Einführung von Office 2010 bei ALSTOM extrem verzögerte, nicht alle Mitarbeiter Access 2003 zur Verfügung hatten und mein Arbeitsvertrag aufgrund der Wirtschaftskrise nicht verlängert wurde, konnte das **Tool nie vollständig fertiggestellt**, getestet und in den Arbeitsprozess eingliedert werden. Trotz allem wurden viele wertvolle Erfahrungen dabei gesammelt, die weiteren Projekten zu gute kommen werden.

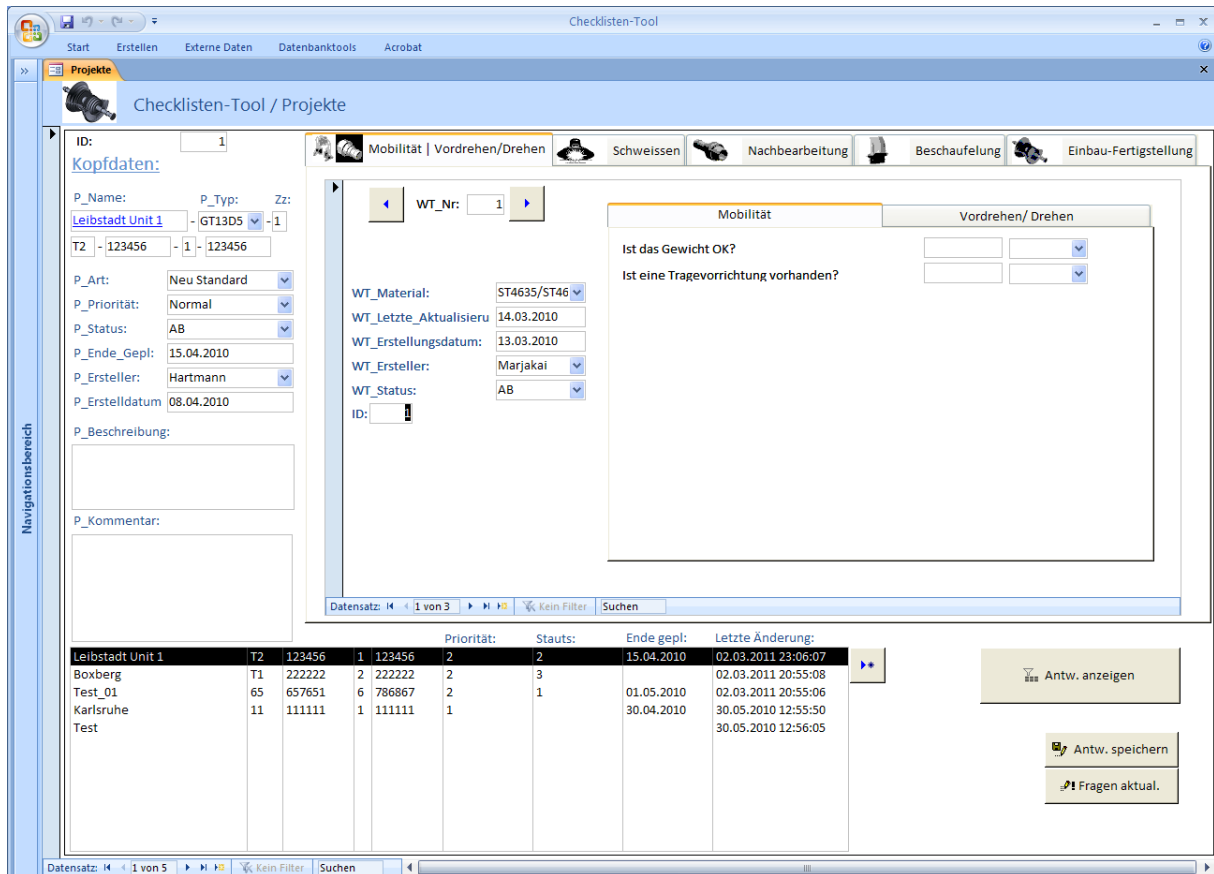


Abbildung 67: Zweiter Entwurf des Checklistentools mit Access 2007 und VBA Modulen

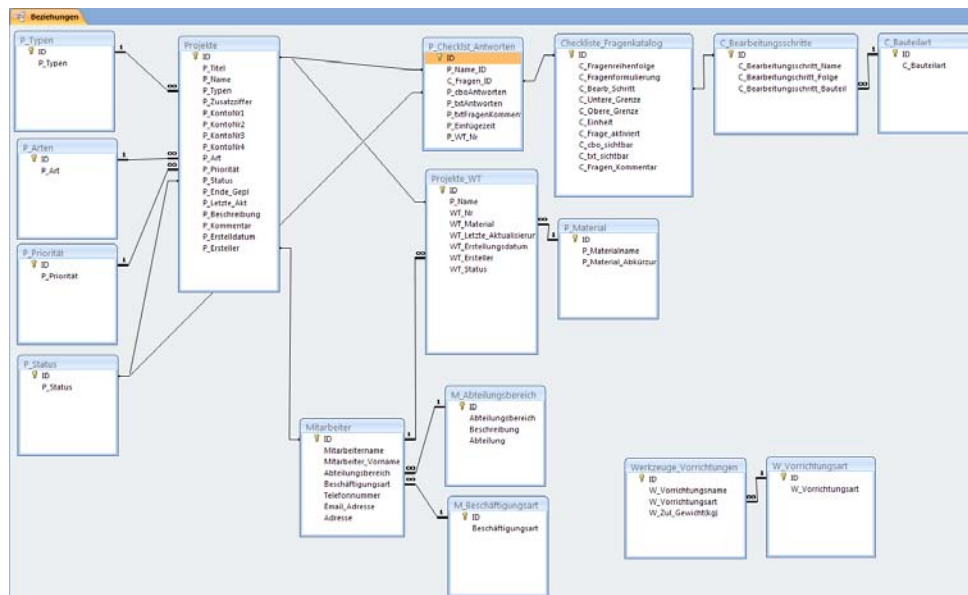


Abbildung 68: Beziehungen der Tabellen / Datenstruktur

Unterschrift Betreuer:

3.8 FP9 Produktentwicklung und Produktmanagement

3.8.1 Versuch und Validierung von Turboladern (BMTS, Stuttgart)

In der Produktentwicklung ist der Bereich „Versuch und Validierung“ die wichtigste Verbindung zwischen der Theorie und der Praxis. Dieser Sektor ermöglicht einem Unternehmen ein methodisch konstruiertes, ausgelegtes und simuliertes Produkt zu testen, auszuwerten und anschließend zu bewerten.

Bei Bosch Mahle Turbosystems (BMTS) ist dieser Bereich besonders interessant, da die NFZ / KFZ – Abgasturbolader in verschiedensten Variationen direkt vor Ort im eigenen Labor oder einigen anderen nahegelegenen Prüfeinrichtungen der Mutterkonzerne Bosch AG und Mahle AG getestet werden können. Die Prüfstände müssen höchsten Anforderungen genügen und bestenfalls rund um die Uhr ausgelastet sein, sodass die komplexen Anlagen schnellst möglichst amortisiert werden. Um den Kundenansprüchen gerecht zu werden müssen diverse erfolgreiche Belastungstest und Dauerläufe unter härtesten Bedingungen mit gegebenen Anforderungen nachgewiesen werden.

Die Haupttätigkeiten eines BMTS-Versuchingenieurs gliedern sich dabei folgendermaßen:

- Versuchsplanung / Organisation
- Erstellung einer Versuchsbeschreibung / Anweisung / Definition der Anforderungen
- Organisation der Herstellung eines Versuchsladers / Begleitung
- Überwachung des Versuchsablaufs / Begleitung
- Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse
- Dokumentation / Bewertung / Präsentation / Diskussion der Ergebnisse

Während meiner Tätigkeit als Werkstudent habe ich meine Betreuerin im Bereich der „Überwachung und Begleitung des Versuchsablaufs“ sowie bei der „Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnissen“ unterstützt, da diese Aufgaben besonders zeitintensiv sind und eine guten Einblick in die Entwicklungs- und Versuchstätigkeiten geben.

3.8.1.1 Überwachung und Begleitung von Versuchsabläufen

Die Versuche werden bei BMTS in der Regel nicht von dem organisierenden Versuchingenieur selbst durchgeführt, sondern als definierter Auftrag an externe oder interne Labors weitergegeben, welche die Experimente gemäß der Versuchsbeschreibung durchführen und alle vorgegebenen Daten liefern müssen. Das heißt ein in der Fertigung hergestellter Prototyp wird zuerst gezielt vermessen und anschließend dem Labor übergeben. Die nötigen Anforderungen und Versuchsabläufe werden digital übergeben und abgesprochen. Gegebenenfalls wird das Experiment vor Ort begleitet und überwacht. Anschließend werden die von einer Software aufgezeichneten Messdaten BMTS übermittelt. In der Regel werden nach dem Versuch die getesteten Komponenten zerlegt, untersucht und mit Bildern und Kommentaren dokumentiert und befundet.



Abbildung 69: Heißgasprüfstand während einem Versuchsdurchlauf²⁹

In der Versuchsdurchführungsphase entstehen sehr hohe Kosten für das Unternehmen. Deshalb ist es gerade in dieser Phase für das Unternehmen entscheidend, dass dabei keine Probleme oder Fehler auftreten. Jedoch ist gerade während dem Versuch das Fehler-Risiko am Größten. Das Versagen eines Messfühlers, aufgrund der hohen Temperatur- und mechanischen-Belastungen, fehlerhaftes Installieren der Mess-Apparatur, ein Ausfall der Versuchsanlage während einem Dauerlauf oder Fehler im Versuchsablaufs-Programm zählen dabei zu den am häufigsten auftretenden Problemen, die es gilt durch einen optimierten Versuchsprozess auszuschließen oder zu minimieren..

3.8.1.2 Auswertung und Darstellung der Versuchsergebnisse

Die Messdaten werden als „Roh-Daten“ an BMTS übermittelt und von Werkstudenten und Mitarbeitern ausgewertet. Es handelt sich dabei um sehr große und zum Teil unhandliche Dateien (bis zu mehreren GB) dessen Inhalte kontrolliert und in Diagrammen übersichtlich dargestellt werden müssen. Hierfür gibt es teilweise vom Prüfstandshersteller vorgefertigte Makros, die die Daten in Excelsheets konvertieren und somit besser handtierbar machen. Für die Diagrammdarstellung wird bei BMTS eine separate Software (UniPlot) benutzt, die kompatible Schnittstellen zu Excel hat. Erstellt werden die Diagramme entweder durch vorgefertigte Auswertungsvorlagen und Automatisierungsdateien oder manuell, Schritt für Schritt. Anschließend werden daraus Versuchs-Dokumentationen und Präsentationen erstellt.

Um möglichst viel Zeit bei der Auswertung zu sparen, sind viele Automatisierungsmechanismen nötig. Da es jedoch viele verschiedene Versuchs-Durchführungsvarianten gibt, werden immer wieder Automatisierungs-Auswertungsdateien mühsam erstellt und angepasst. Diese erweisen sich jedoch oft als wenig flexibel und schlecht anpassbar. Vor allem bei kleinen Änderungen der verschiedenen Prüfstände wie z.B. Umbenennung eines Kanals zur Messgrößen-Aufzeichnung, hinzufügen oder entfernen von Messgrößen oder Anpassung von Diagrammeigenschaften.

²⁹ ([bmts1], 2011)

Deshalb entwickelte ich ein Diagramm-Manager-VBA-Tool, welches im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

3.8.1.3 Entwicklung eines Diagramm-Manager Tools

Das Tool wurde zum Erstellen von UniPlot Auswertungsdiagramm-Dateien aus Daten in Excel Tabellen entwickelt. Es ist zur einen Hälfte in VBA Excel geschrieben und der zweite Teil ist in der UniPlot internen „UniScript-Sprache“ (ähnlich wie C) geschrieben. Der Vorteil von Uniscript ist, dass Argumente von VBA aus übergeben werden können bzw. Uniscripte von VBA aus gestartet werden können.

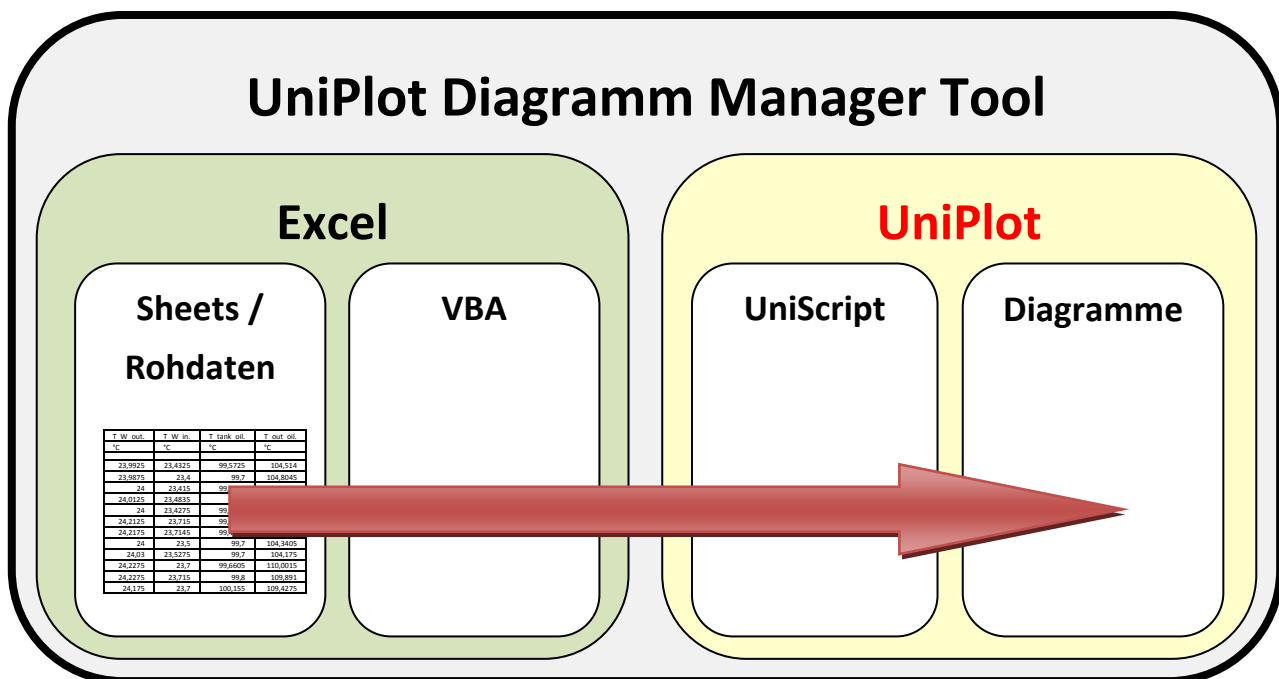


Abbildung 70: UniPlot Diagramm Manager Tool - Übersicht

Durch die Kombination der beiden Anwendungen konnte ein effizientes und universelles Tool geschaffen werden, das die Auswertung wesentlich vereinfacht und verkürzt. Dabei wird der Benutzer in den im Folgenden dargestellten Schritten zum Ziel begleitet.

Eine UniPlot Dokument besteht aus verschiedenen Seiten, die verschiedene Diagramme, Legenden und Bezeichnungsfelder haben. Mit dem Manager können pro Dokument bis zu 10 Seiten eingerichtet werden, die als Automatisierung gespeichert werden können. Falls mehr benötigt werden, können mehrere Automatisierungsdateien zu einem Projekt erstellt werden. Alle Einstellungen sind variabel anpassbar und vom User beliebig editierbar. Das Tool wurde übersichtlich und modular strukturiert und es ist deshalb bei Bedarf von einem VBA Programmierer möglich, es mühelos weiter zu entwickeln.

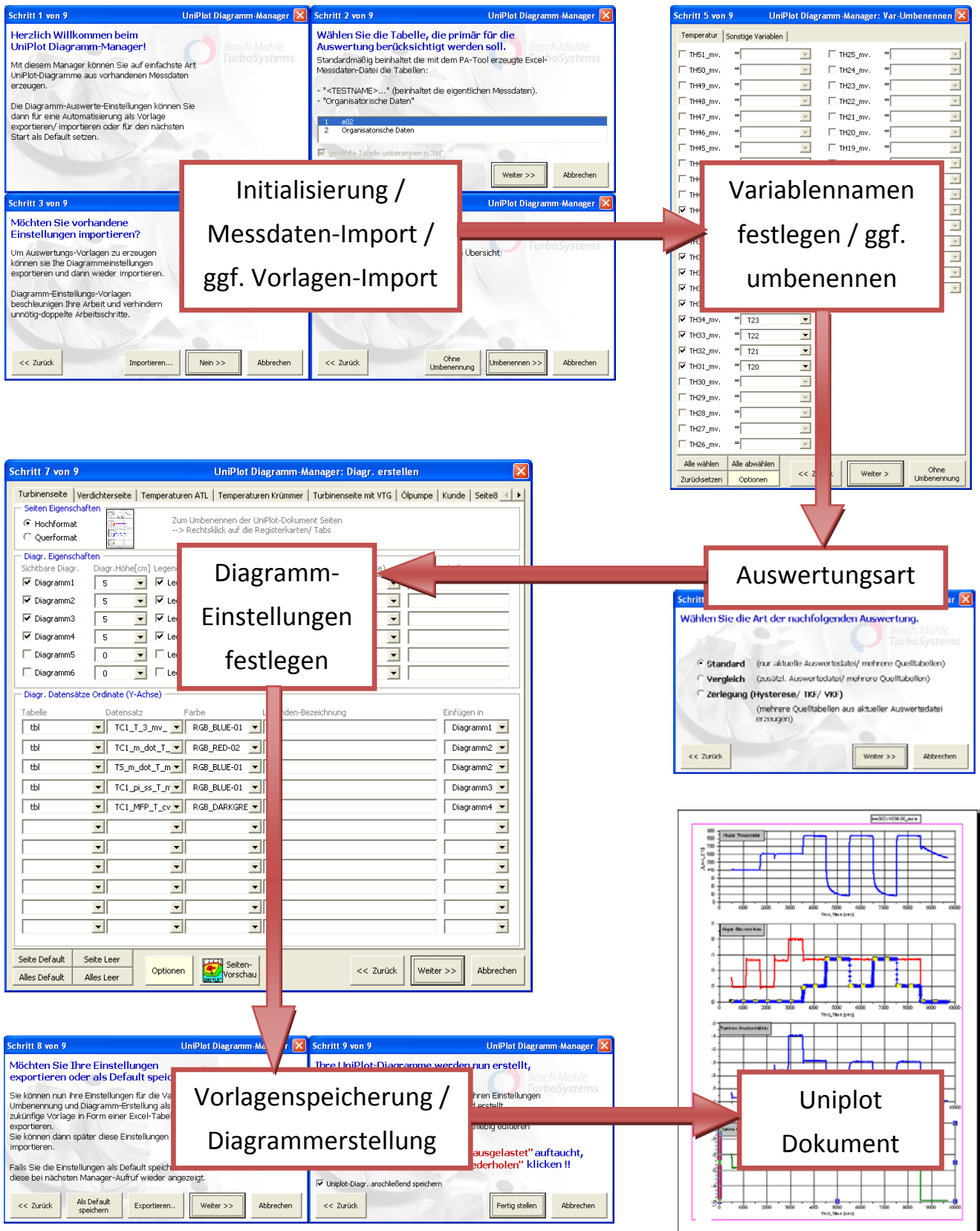


Abbildung 71: UniPlot Diagramm Manager Tool – Einzelne Schritte / GUI Navigation

Wie in Abbildung 71 dargestellt gliedert sich das Tool in mehrere GUIs welche den Benutzer durch das Programm begleiten.

Zu Beginn einer Auswertung müssen die Messdaten in Exceltabellen vorliegen (zum Konvertieren der Prüfstands-Roh-Daten muss ggf. ein Excel-Macro des Prüfstandsherstellers verwendet werden). Das **Messdatensheet kann** nun mit dem Diagramm Manager Tool **geöffnet werden**. Das Sheet kann ggf. mehrere Tabellen enthalten, der Benutzer muss nun die Quelltabellen, die in der Auswertung benutzt werden sollen, mit Hilfe einer Listbox wählen. Im nächsten Schritt wird entschieden, ob man eine bereits **vorhandene Vorlage importieren**, oder eine **neue Vorlage erstellen** will. Falls man eine vorhandene Vorlage benutzen will, kann man diese auswählen und sich mit „Weiter“ durch die Menüs klicken. Andernfalls muss jeder Schritt aufmerksam bearbeitet und Einstellungen vorgenommen werden


Der Benutzer hat anschließend die Möglichkeit, **Variablen der aufgezeichneten Messdaten umbubenennen**, um eine einheitliche und standardisierte Messdatenbenennung zu gewährleisten. Da besonders oft verschieden benannte Thermoelemente/kanäle während dem Versuch benutzt werden, wurden die „TH“-Kanäle / Variablen in einem eigenen Registerkartenreiter (=Tab) aufgeführt. Alle „Sonstigen Variablen“ können im zweiten Tab ggf. umbenannt werden. Eine Umbenennung könnte folgendermaßen aussehen

z.B.: TH34_mv.(=Mahle-Prüfstands Kanalbezeichnung) → T23 (=BMTS-Messstellenbezeichnung)

Anschließend folgt die **Auswahl der Auswertungs-Art**. Neben der Standard-Auswertung können eine Vergleichsauswertung aus mehreren Quelldateien (verschiedenen Excel-Workbooks) und eine Zerlegung vorhergehende (für die Auswertung einer „Hysteresen-Messung“) gewählt werden.

Die eigentliche **Festlegung der Diagramm-Einstellungen** für das Erstellen der Uniplot-Diagramme / bzw. die Spezifizierung der Vorlage erfolgt im nachfolgenden Schritt. Der Benutzer kann beispielsweise festlegen wie viele Diagramme auf eine Seite im UniPlot-Dokument kommen sollen, welche Datensätze über welchen Datensätzen dargestellt werden sollen, ob die Seite im Hoch oder Querformat eingefügt werden soll, ob die Legende angezeigt werden soll, kann eine alternative Legendenbezeichnung vornehmen, sowie eine Farbe festlegen. Eine besonders hilfreiche Funktion ist die Seitenvorschau, die direkt UniPlot startet und die Roh-Diagramme in definierter Größe darstellt. Die Größe der jeweiligen Diagramme muss ebenfalls vom Benutzer vorgegeben werden, die Anordnung erfolgt automatisch, von oben nach unten. Jeder einzelne Tab stellt dabei eine UniPlot-Dokumentenseite da. Das Toll wurde aus programmiertechnischen Gründen auf nur 10 Seiten pro UniPlot-Dokument beschränkt. (Ausbaufähig durch eine überarbeitete GUI.) Unter „Optionen“ können die Pfade zu benutzten Verzeichnissen sowie weitere Einstellungen definiert werden.

Anschließend kann man die **erstellte Vorlage speichern** und mit „Fertig stellen“ die definierte **Auswertung durch UniPlot** (mit Hilfe eines Uni-Scripts) **ausführen**. Nach wenigen Sekunden wird das resultierende **UniPlot-Dokument** mit allen Diagrammen angezeigt und ggf. automatisch gespeichert.

Unterschrift Betreuer: 28.07.2011 

3.9 FP10 Fachrichtungsbezogenes Projektpraktikum

3.9.1 Fracture Mechanics Assessment of Structure GT Parts (ALSTOM, CH, Baden)

Der folgende Praktikumsbericht wurde in Englischer Sprache verfasst, da die offizielle Unternehmenssprache bei ALSTOM POWER / Gasturbine „Englisch“ ist, sämtliche Teammitglieder in der besuchten Entwicklungsabteilung kein Deutsch verstehen und alle ALSTOM Dokumente auf Englisch erstellt werden, bzw. diverse Dokumente auch von mir auf Englisch erstellt wurden.

3.9.1.1 Motivation

Fracture Mechanics (FM) considerations are performed for lifetime prediction during the design of a part as well as for explanation of damages and root cause analyses seen in the field (at power plants from customers). Assessing Fracture Mechanic procedures in a component part, it is necessary to simulate crack propagation in order to calculate the allowable operating time or in case of a detected crack, to estimate the residual lifetime with FE-tools like ABAQUS or ANSYS. But modeling explicit cracks at different locations in different parts needs a lot of time and calculation resources. Because of that, the purpose of the Structure dynamic team is to assess crack propagation with very simplified FM-analysis (according Newman Raju: 1D-crack model, 2D elliptical crack model, Griffith model, Kogaev approach) only with the transient FEM-solution of uncracked FE-models.

General difficulties during a ALSTOM FM assessment by FE-data are:

- Extraction of the potential crack plane/ crack path (according nodes) from 3D-FE-model/ solution
- Extractions of the basic data for FM calculation out of 3D-FE-model/ solution along the regarding crack.
- Calculation of a 1D crack propagation approach along a crack path (FM stress distribution approximated by a polynomial, stress intensity calculated by “Kogaev” approach)

To accelerate and automate these steps, three user-friendly tools were created by me during the internship.

3.9.1.2 Summary

The following chapters describe the background of three Fracture Mechanics (FM) software tools programmed in Visual Basic Application (VBA) and implemented in MS-Excel. They simplify the procedures during a general ALSTOM FM assessment.

- Extract_Crack_Path_from_FE_(VBA-tool).xls
- Extract_FM_StressAtPath_(VBA-tool).xls
- FM_crack_propagation_Kogaev_(Excel_sheet).xlt

3.9.1.3 FM Basics:

Crack Plane

According Fracture Mechanic theories, a crack plane is always perpendicular to the direction of the maximal most principle stress during a load cycle (crack driving stress) at a crack initial point \vec{x}_0 :

$$\vec{e}_{\max} \{ \sigma_{\max} \} \quad \text{with} \quad \sigma_{\max}(a_0, t_{S_{\max}}) := \max_t \{ \sigma_1(a_0, t) \mid \forall t \in [t_{\text{start}}, t_{\text{end}}] \}$$

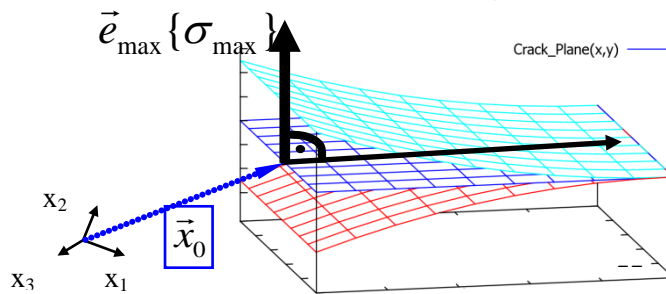


Abbildung 72: Sketch of a 3D surface crack

$$\text{Crack plane} := \vec{x} \mapsto E(\vec{x}) := (\vec{x} - \vec{x}_0) \cdot \vec{e}_{\max} = 0 \quad (\text{means } \vec{e}_{\max} \perp \text{crack plane})$$

Crack Path / Crack Area

In the considered crack plane, different crack type models and according stress fields are assumable:

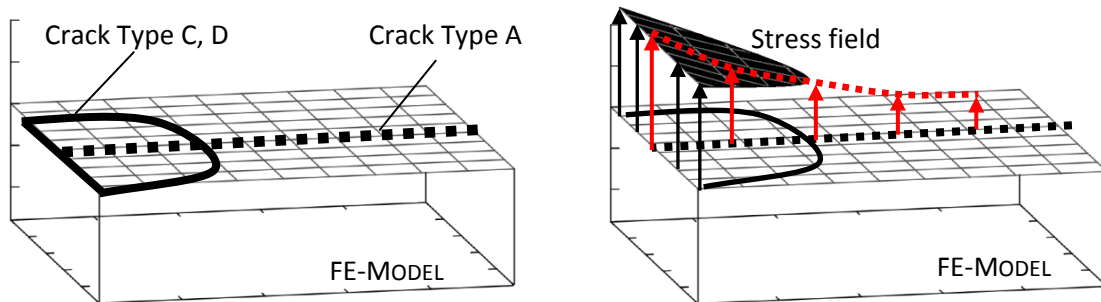
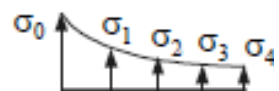


Abbildung 73: Crack types (left) and according stress fields (right)

Available stress field approximations along a crack path:

- Crack Type A (1D surface crack): ■■■■■■
 - Newman-Raju Theory (linear function)
 - Fett & Newman Raju superposed (exponential + linear function)
 - Kogaev theory & Newman Raju (n-order polynomial function)
- Crack Type B (1D centered crack):
 - Griffith Crack theory (uniform stress distribution.)
- Crack Type C, D (2D crack): —————
 - Half elliptical surface crack (Newman Raju)



- Quarter elliptical edge crack (Newman Raju)
- Crack Type C1 (2D crack):
 - M. Shiratori, T. Miyoshi and K. Tanikawa



For more details of the different crack type calculation also see Fracture Mechanic basic literature.

3.9.1.4 Tools Overview

For determination of FM basic data : {locations, stress distributions, temperatures ... } out of FE-solution, different steps / Tools are necessary:

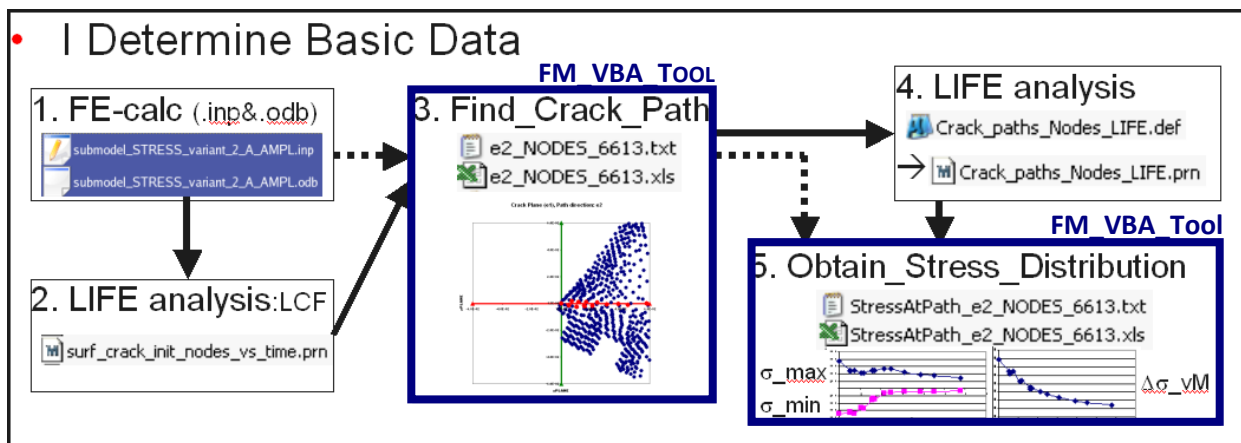


Abbildung 74: Tools Overview

I Determine Basic Data for FM

1. At first a transient FE analysis of the regarding model has to be done. The created files are need for further use: (ABQ: *.inp / *.odb or ANSYS: *.rst / *.lis)
2. After that, an obligatory LCF analysis (using ALSTOM LIFE- Tool) is needed to determine the critical locations and crack initial nodes with minimum LCF-numbers. At this crack initial node the principle stresses & according directions vs. time are necessary (*.prn).
3. The next step is to find the crack path. The tool EXTRACT_CRACK_PATH_FROM_FE_(VBATOOL_3_1).XLS determines the assumed crack plane and proposes a crack path / crack area which has to be adjusted by the user, if required. The Input files are the *.prn-LIFE file from step 2 and the model file (node-coordinates) from the FE-program *.inp (ABQ) / *.lis (ANSYS). The output file (*.txt) contains the node labels and coordinates along a crack path/ line (1D crack) or in a crack plane area (2D crack) , in the global coordinate system and in the crack plane coord. sys.
4. In the fourth step, the principle stresses & according directions & temperatures vs. time at the found crack path nodes are obtained with LIFE: (*.prn) (or a self created file, which contains the solution for the path nodes with ABQ)
5. The last step of the basic-data-process is to obtain the stress distribution. It can be done with the EXTRACT_FM_STRESSATPATH_VBA_TOOL_3_1).XLS. With the Life file *.prn from step 4 and the node path file *.txt from step 3, the stress distributions,

temperatures, and directions, which are needed for a FM assessment will be obtained. It collects data from both files and stores it in an output file.

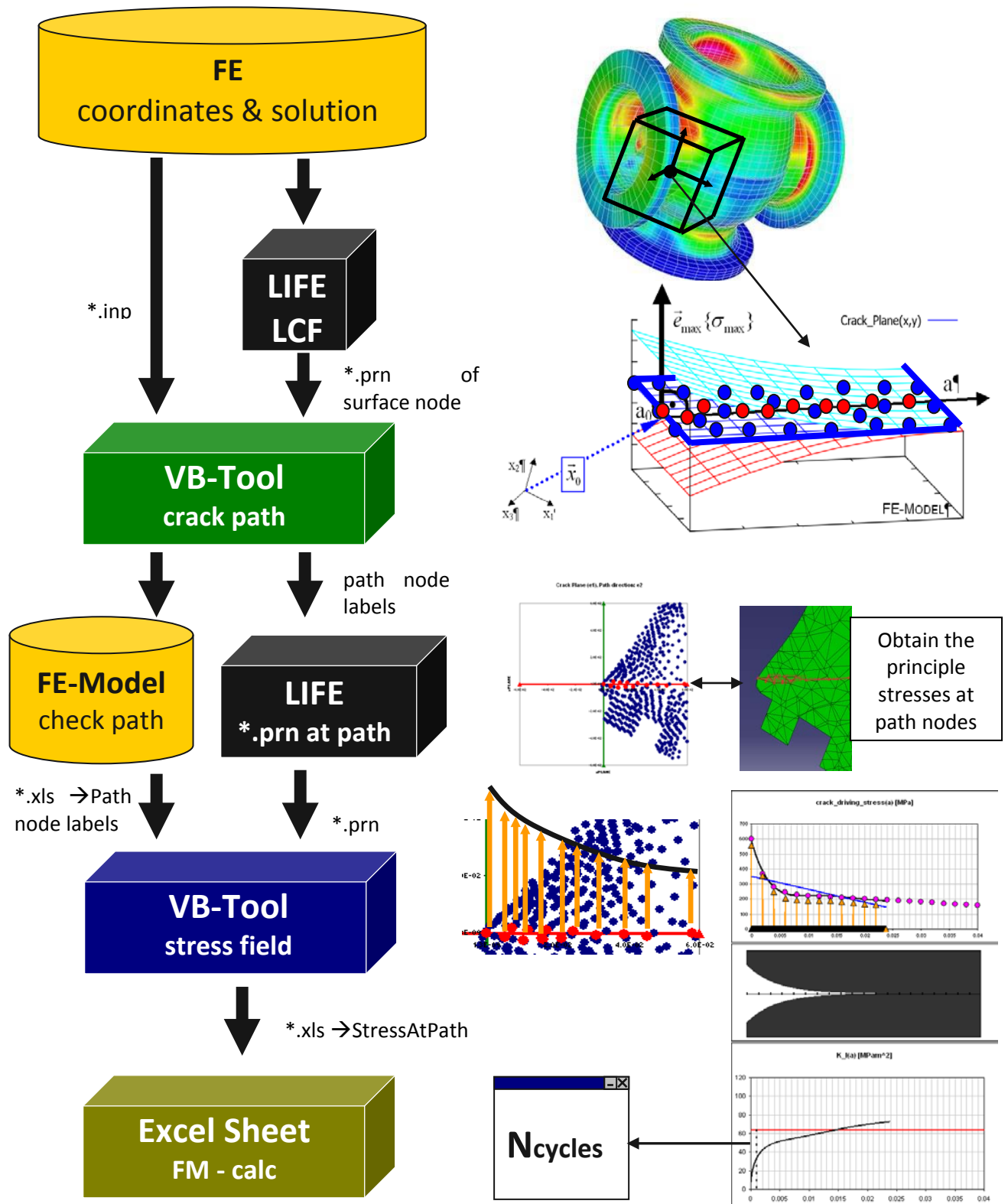



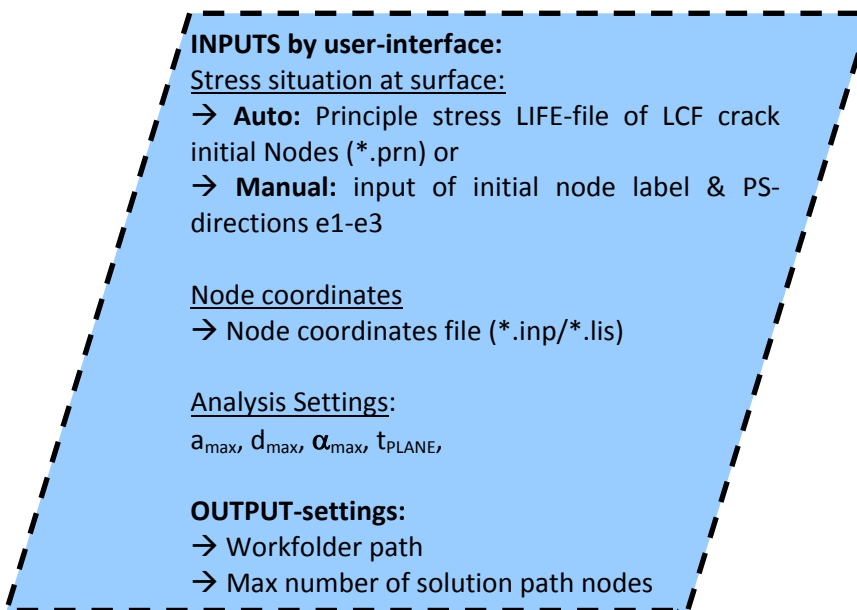
Abbildung 75: Tools Overview of FM assessment steps

3.9.1.5 Extract_Crack_Path_from_FE_VBA-tool

Global process of program

In the following chapter the program-structure of the VBA-tool is described by flow-charts. The userform procedures are marked by blue flow-charts with dashed border: 

All the other procedures are working automatically.

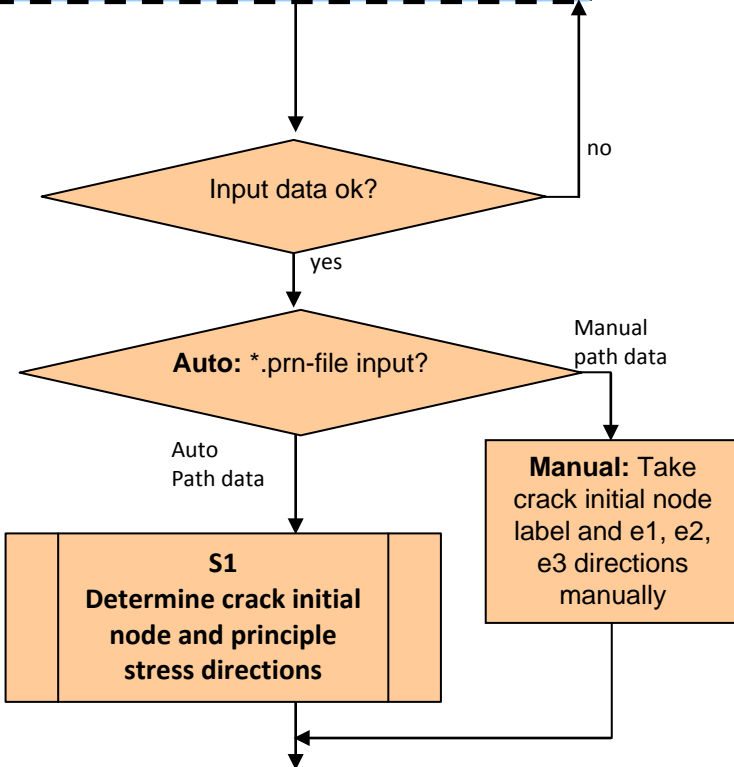


Input

Files: Put the FE node coordinates either from ABAQUS (model-file: *.inp) or ANSYS (List of all Nodes *.lis) in. Beside one has also the possibility to put in the node coordinates in a self-created Excel-table with columns: 'Nodes; x; y; z' or space-delimited text-file 'Nodes x y z'.
 → **Select Tab, which should be used: 'Automatical' or 'Manual' (optional)**

Analysis Settings: The find crack settings will be set as default, but can also be changed in tab: 'Settings' manually. (It is also possible to adjust them in the end)

User-Settings: Define a work-folder and choose the maximal number of path solution nodes. All other input data can be let as default.



Prove input data & save it in variables

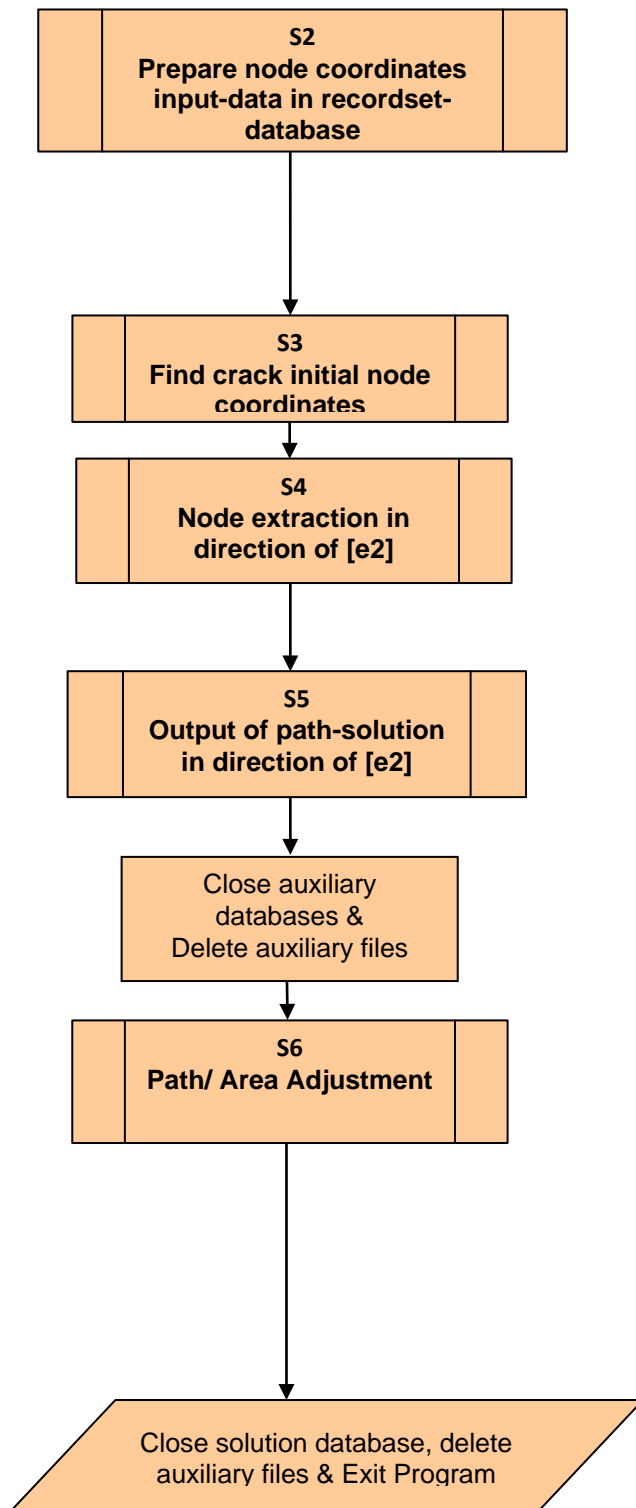
If Input data is ok then go further, otherwise request again.

Crack initial node data handling

If user choose the Tab 'Manual' (didn't put in a *.prn-LIFE-file), the manual user-input will be taken out of the textboxes. Otherwise obtain it in S1.

Determine crack initial node & principle stress directions

→ Call subprocess



Prepare node input-data in recordset-database

Create a temporary databases (in PC RAM) for Node range - calculation and output.

→ Call subprocess

Find crack initial node coordinates

→ Call subprocess

Node extraction in direction of [e2]

→ Call subprocess

Output of solution in direction of [e2] (in .txt files & Excel)

→ Call subprocess

Path/ Area Adjustment

Close auxiliary databases and files, which won't be used any more.

Start user interface to adapt crack path/ area manually

→ Call subprocess

Output

Output files: path nodes in direction of e2 in a *.txt, or *.html – file (and Excel file)

Remark: The Output files were created in S4 and S5, or after user adjustment in S6.

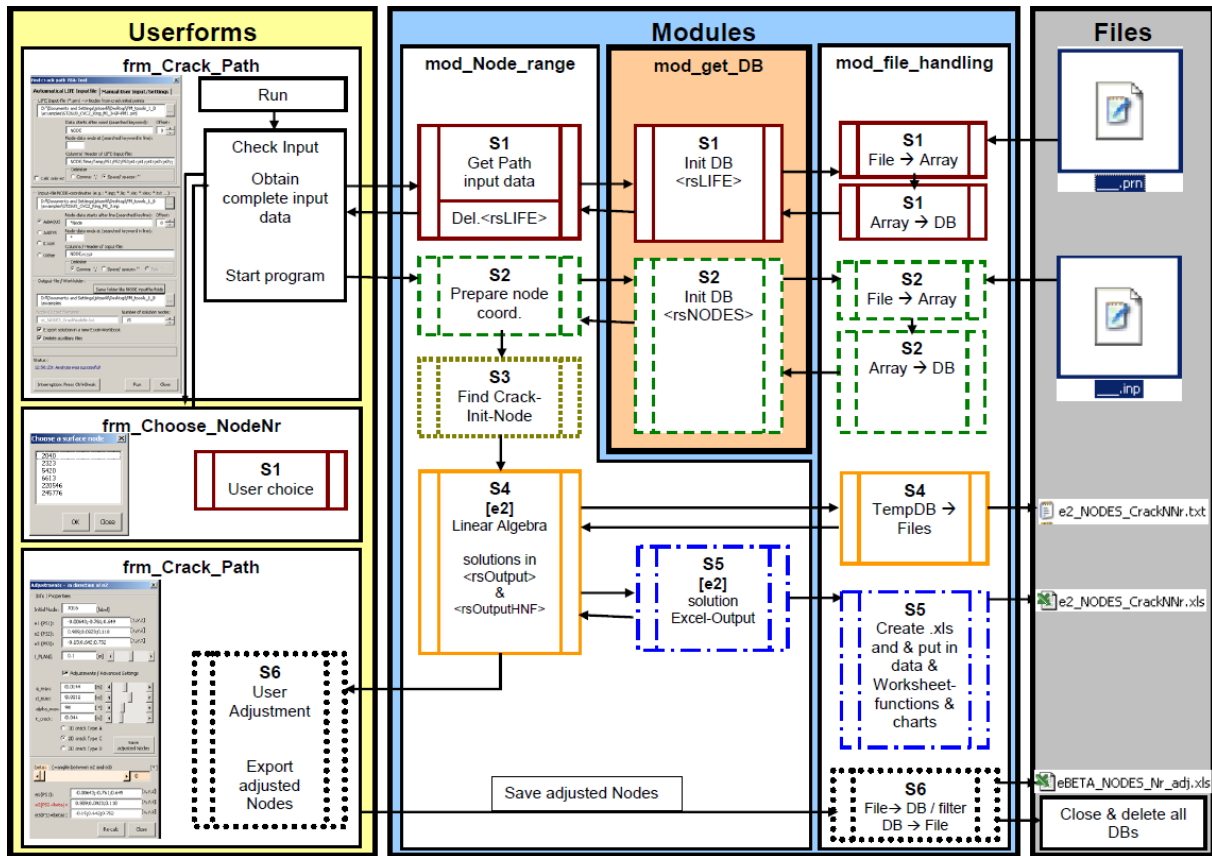


Abbildung 76: Tool modularisation

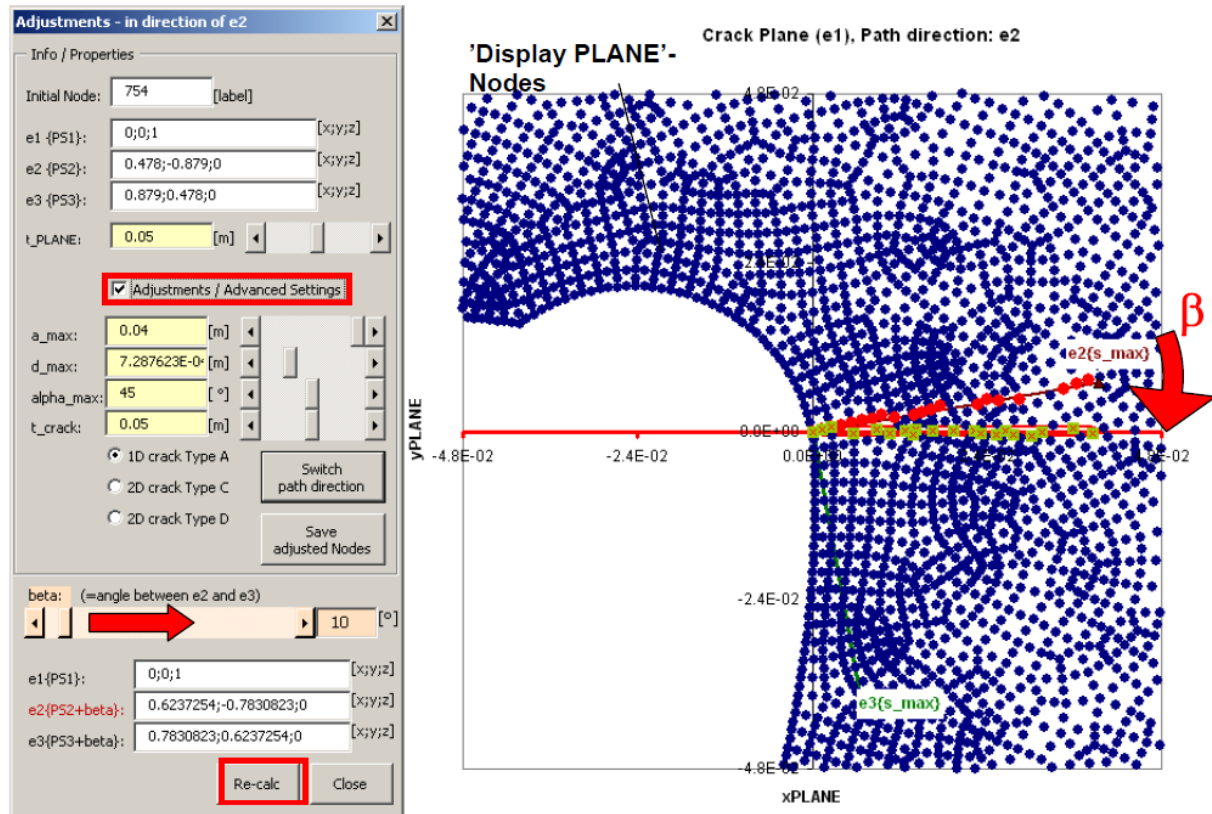
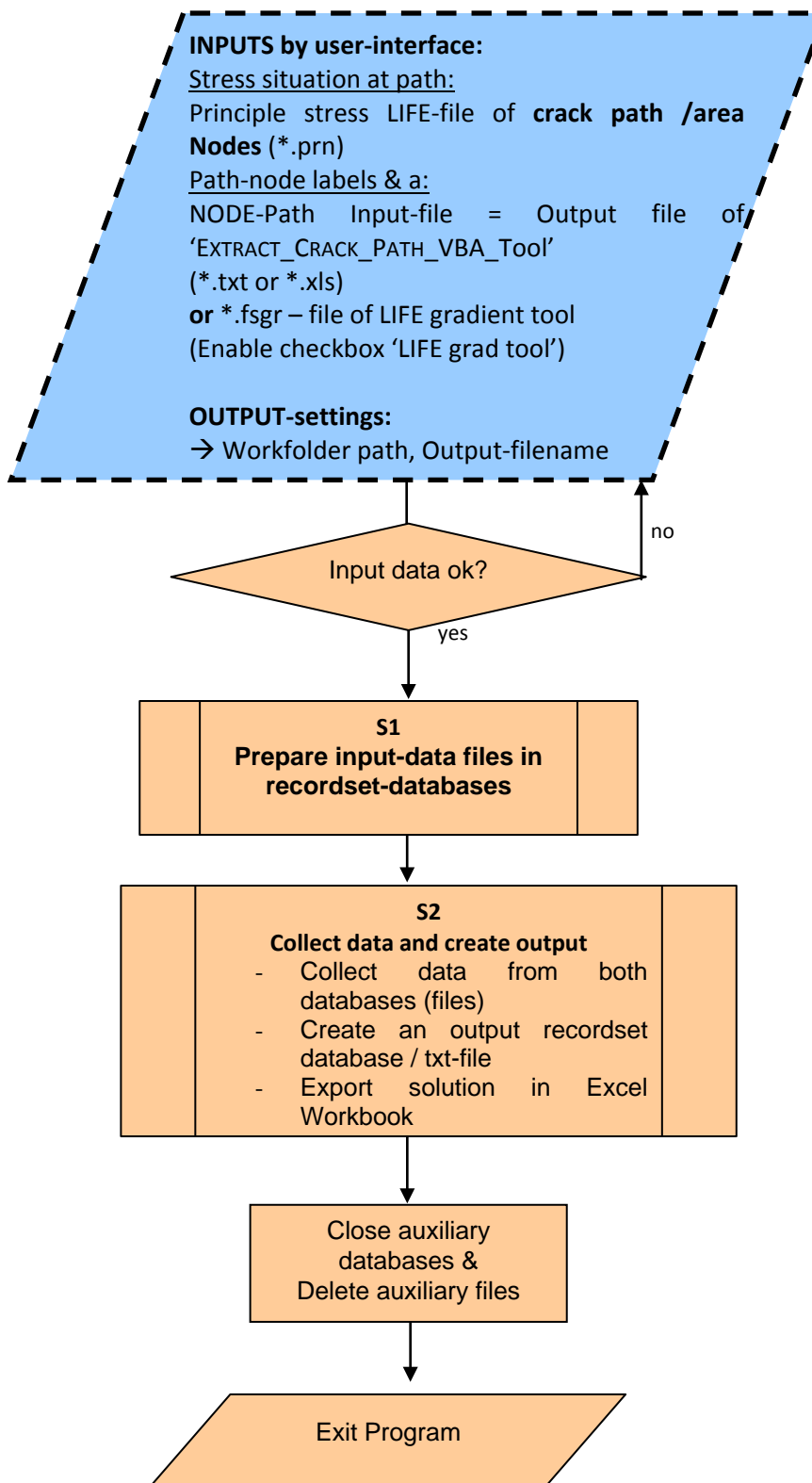


Abbildung 77: GUI – Excel interaction

3.9.1.6 Extract_FM_StressAtPath_VBA-tool

Global Process



Input <frm_Crack_Path>

Files: The principle stress file of the crack path/ area nodes created with LIFE is required

User-Settings: Define a work-folder, all other input data can be let as default.

Prove input data & save it in variables

If Input data is ok then go further, otherwise request again.

Prepare input-data files in recordset-databases

→ Call subprocess

Collect data and create output

→ Call subprocess

Close all and delete aux. files

Close auxiliary databases and files, which won't be used any more. ('LIFE_auxilliary.txt' and 'schema.ini' file for text file → database conversion)

Output

Output files: Stresses and temperatures at path nodes in a *.txt – file (and or Excel file)

Remark: The Output file was created in S2.

3.9.1.7 FM_crack_propagation_Kogaev_Excel-sheet

Subprocess S3.2.3: [Kogaev-Sheet] Evaluation of $\Delta K(a)$ with Kogaev & Newman Raju

The evaluation of $\Delta K(a)$ is based on a proposal of **Kogaev V.P**, a Professor at the Mechanical Engineering Research Institute, Griboedov str. 4, Moscow Centre, USSR. He introduced this approach as an example in his book: **Strength calculations under time variable stresses** (in Russia)– M. Mashino Stroenie, 1993 – on page 347 & 348.

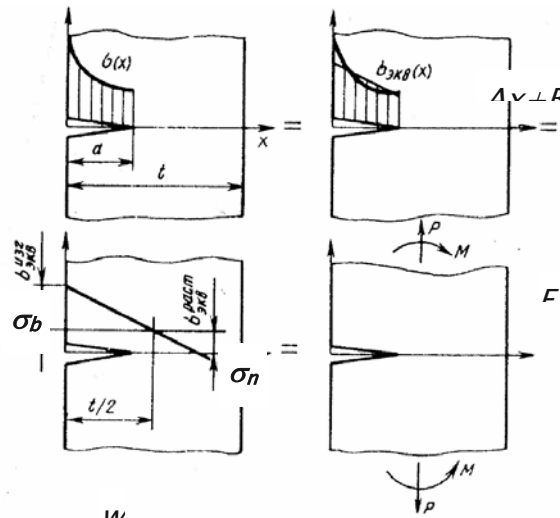


Abbildung 78 Kogaev's sketch of his equal line proposal³⁰

Kogaev proposal:

As shown in above, Kogaev recommends to recalculate a **linear stress** distribution **equal to** the resulted **Force F** and **Moment M** of the approximation function, **at each crack size a**. Now it is possible to calculate for each crack size a, the according stress intensity $\Delta K(a)$ with the **Newman Raju** approach for linear stress distributions.

equal Force: (same surface area)

$$\int_0^a (Ax + B) dx = \int_0^a Poly(x) dx := F(a) \quad (1)$$

equal Moment: (with reference to a_0)³¹

$$\int_0^a (Ax + B) \cdot x dx = \int_0^a Poly(x) \cdot x dx := M(a) \quad (2)$$

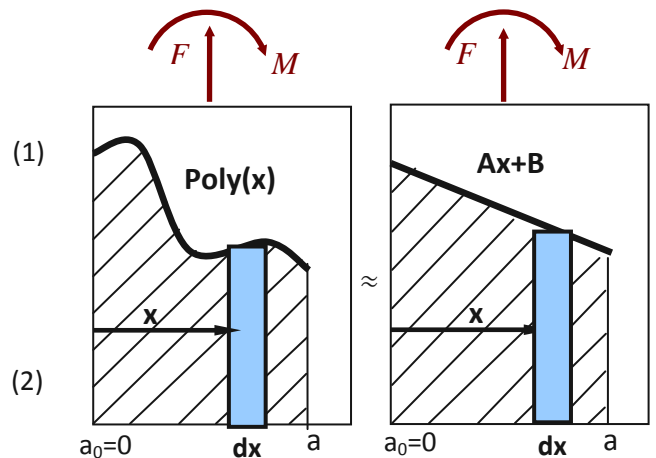


Abbildung 72 Create equivalent linear stress distribution for each crack size a

³⁰ ([kog348], 1993)

³¹ The Moment with reference to the current crack size a results the same linear stress distribution, because of technical mechanics theory. So the reference point doesn't matter.

In the case of a polynomial approximation function (Kogaev-Excel-Sheet) it is possible to find an analytic solution for the definite integrals for the forces := $F(a)$ and for the moments := $M(a)$ of the polynomial at each crack size a .

Remark:

In case of an other approximation function (e.g. polygon) it is mostly necessary to calculate the integral values numerically in a stepwise approach for each crack size a .

The parameters A and B of the equal line are still unknown, but could be derived by simple math arrangements:

$$\int_0^a (Ax + B) dx = \frac{1}{2} A \cdot a^2 + B \cdot a \stackrel{!}{=} F(a) \quad (3)$$

$$\int_0^a (Ax + B) \cdot x dx = \frac{1}{3} A \cdot a^3 + \frac{1}{2} B \cdot a^2 \stackrel{!}{=} M(a) \quad (4)$$

With the elimination of $B \rightarrow (3)$ in (4) it results for A at crack size a :

$$A(a) = \frac{6}{a^2} \cdot \left(\frac{2M(a)}{a} - F(a) \right) \quad (5)$$

And with (5) in (3) it results for B at crack size a :

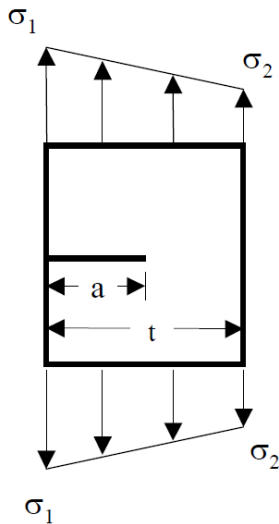
$$B(a) = \frac{2}{a} \cdot \left(2F(a) - \frac{3M(a)}{a} \right) \quad (6)$$

For the Newman Raju equation, a separation of the normal stress and bending stress part according is necessary:

$$\sigma_n := A(a) \cdot \frac{w}{2} + B(a) \quad (7)$$

$$\sigma_b := -A(a) \cdot \frac{w}{2} \quad (8)$$

The Newman Raju approach for 1D surface cracks Type A can now be used for the evaluation of the stress intensity factor.



Normal stress / Bending stress

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad \sigma_b = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (9) \text{ \& \ } (10)$$

Stress Intensity Factor

$$K(a) = K_n + K_b = (Y_n(a)\sigma_n + Y_b(a)\sigma_b)\sqrt{\pi a} \quad (11)$$

Shape Factors

$$Y_n(a) = 1.122 - 0.231\frac{a}{t} + 10.550\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 21.710\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 30.382\left(\frac{a}{t}\right)^4$$

$$Y_b(a) = 1.122 - 1.40\frac{a}{t} + 7.33\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 13.08\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 14.00\left(\frac{a}{t}\right)^4$$

Abbildung 73 Newman Raju approach for linear stress distribution at 1D cracks

The resulted stress intensity factor can be summarized with (7) & (8) in (11):

$$K(a) = \left(\left(B(a) + A(a)\frac{t}{2} \right) \cdot Y_n(a) - A(a)\frac{t}{2} \cdot Y_b(a) \right) \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Remark:

The stress intensity has to be evaluated at each crack size a with a new equal linear stress distribution. This is due to A and B depending on definite integrals in the interval $\{0;a\}$ which have to be recalculated for each a .

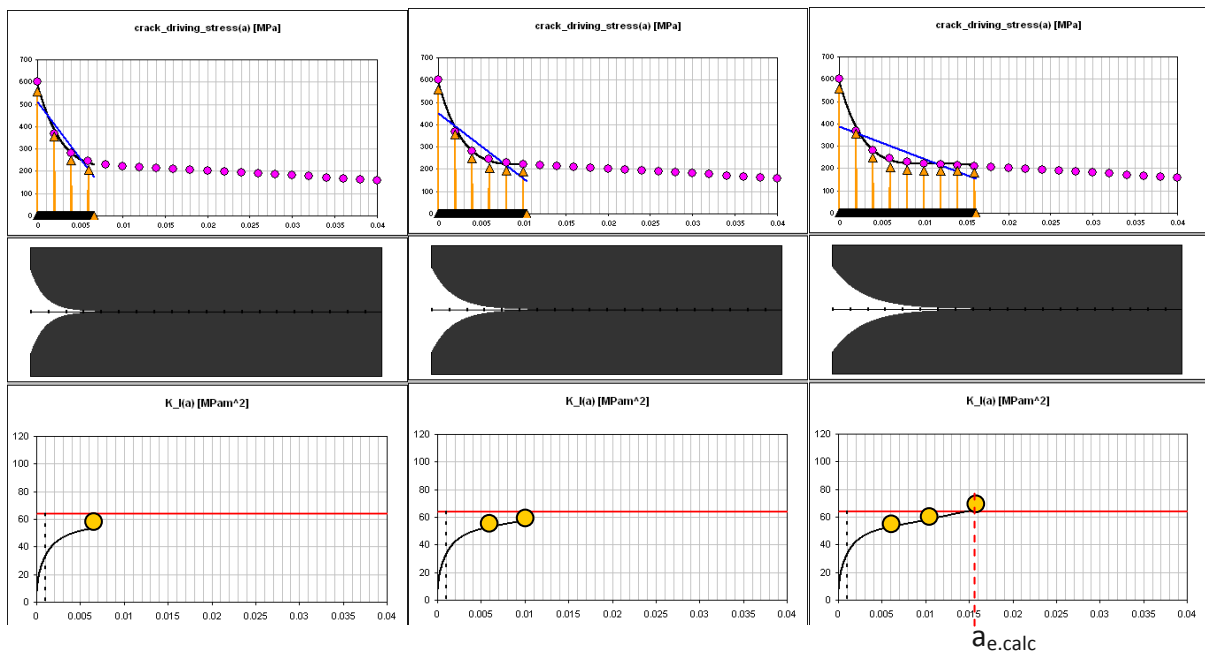


Abbildung 79 Evaluate the stress intensity factor at different discrete crack sizes a_d

For the calculation of the end of life intersection: $a_{e,calc}$, a continuous stress intensity curve is necessary. This could be done with a linear interpolation between discrete evaluated stress intensity values $K(a_d)$, where a_d are discrete crack sizes.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: ALSTOM, Birr	17
Abbildung 2: ALSTOM, Birr, Rotorfactory	18
Abbildung 3: Mechanische Anordnung vom Joule-Prozess	19
Abbildung 4: ALSTOM GT 26 Schnittdarstellung	19
Abbildung 5: Doppelflutige Niederdruckturbine	20
Abbildung 6: Skizze von einer einflutigen Dampfturbine gekoppelt mit einem Generator.....	20
Abbildung 7: Turbine Rotor Production Process Birr, Overview1	21
Abbildung 8: Turbine Rotor Production Process Birr, Overview2	21
Abbildung 9: Turbine Rotor Production Process Birr, Overview3	22
Abbildung 10: Turbine Rotor Production Process Birr, Overview4	22
Abbildung 11: Schematische Übersicht vom Kernkraftwerk Leibstadt.....	24
Abbildung 12: Containerschiff und Schwere Baustellenfahrzeuge mit ABB-Turboladern	26
Abbildung 13: Dieselmotoren und Diesellokomotiven mit ABB-Turboladern.....	26
Abbildung 14: Funktion und Schnittmodell eines Turboladers.....	27
Abbildung 15: Übersicht ABB – Turbolader.....	27
Abbildung 16: Verschiedene Schaufeldesigns bei TPL – Verdichterrädern.....	28
Abbildung 17: kleinstes Radialverdichterrad von BMTS	29
Abbildung 18: Schnittmodell von einem BMTS Abgasturbolader	30
Abbildung 19: Nachbearbeitung von BMTS Turbinenrädern	30
Abbildung 20: Schweiß-Prozessanalyse in der Rotorfabrik, Birr	31
Abbildung 21: Zusammenfügen der Wellenteile	32
Abbildung 22: Links: TIG Schweißen, Rechts UP-Schweißen.....	32
Abbildung 23: Darstellungen von Schweiß- und Wärmebehandlungsverfahren.....	32
Abbildung 24: Anbringung der Thermoelemente zur Temperaturüberwachung	33
Abbildung 25: Berechnetes Spann-Backenfutter	34
Abbildung 26: Skizze des Berechnungsmodells: Turbinenwelle beim Drehen	35
Abbildung 27: Aufstellung der Gleichgewichtsbedingungen	35
Abbildung 28: Berechnung der unbekanntten Kräfte mit Maple.....	36
Abbildung 29: Drehen eines Turbinenwellenteils	38
Abbildung 30: Revision in Leibstadt: leeres Gehäuse der Niederdruck-Turbinen	39
Abbildung 31: Wasserbecken im Kernkraftwerk Leibstadt	40
Abbildung 32: Bsp. Tages Besetzungsplan (links) für die Ausweissammeltafel (rechts).....	42
Abbildung 33: Bsp. für eine Tagesstatistik - Tag-Schicht.....	43
Abbildung 34: Besuch im Drywell / Reaktorbereich	44
Abbildung 35: Drywell Wasserpumpen Ventil	44
Abbildung 36: Luft-Spalt (Clearance) zwischen einer GT Schaufel und deren Gehäuse	45

Abbildung 37: Boroskop Messung an der-GT Anlage im ALSTOM-Testcenter in Birr	46
Abbildung 38: Schemaskizze der Farbeindring Prüfung.....	48
Abbildung 39: Magnetpulverprüfung für Querfehler	49
Abbildung 40: Magnetpulverprüfung für Längsfehler.....	49
Abbildung 41: Metallographie, Ätzverfahren.....	51
Abbildung 42: Fertiges Verdichterrad TPL77.....	52
Abbildung 43: Fertigungsablauf beim Verdichterrad TPL77 CV12	54
Abbildung 44: Auftrag mit 20 kleinen Verdichterrohlingen.....	55
Abbildung 45: Vorgedrehter TPL77-Rohling.....	55
Abbildung 46: Vorgefrästes Verdichterrad TPL77 (Wärmebehandlungskontur).....	56
Abbildung 47: Fünfschichtige CNC Fräsmaschine(links) und Vorschaltrod (rechts).....	57
Abbildung 48: Bohrlöcher mit Innengewinde für das Balancieren	58
Abbildung 49: Balancierebene im Bereich des Verdichteraustritts	58
Abbildung 50: Schleudernanlage Barbour-Stockwell (USA): Behälter mit Berstschutzringen	59
Abbildung 51: Schleudernanlage Schenck BI4U: Deckel mit Antriebseinheit	60
Abbildung 52: Aufbau Getriebe und Antriebswelle Schleudernanlage Schenck BI4U.....	61
Abbildung 53: Eingespanntes Verdichterrad.....	62
Abbildung 54: auf Schleuderdorn aufgespanntes TPL - Verdichterrad	62
Abbildung 55: auf Schleuderdorn aufgespanntes VTR – Verdichterrad	63
Abbildung 56: Polygon Wellen-Narbenverbindung zwischen Verdichterrad & Welle.....	64
Abbildung 57: Balancieranlage.....	64
Abbildung 58: Fertiger TPL77 Turbolader	65
Abbildung 59: Gliederung der Tätigkeiten eines Mitarbeiters in der Arbeitsvorbereitung.....	67
Abbildung 60: Projektbeispiele für den Netzwerkordner Anlagenspeicher	68
Abbildung 61: Projektdateinamen mit wichtigsten Projekt-Eigenschaften	68
Abbildung 62: GUI zur bedienerfreundlichen Eintragung der Tätigkeiten eines Mitarbeiters	68
Abbildung 63: Übersicht der eingetragenen Tätigkeiten eines Mitarbeiters.....	69
Abbildung 64: Übersicht der PA und NPA-Anteile aller Mitarbeiter	69
Abbildung 65: Übersicht aller Projekt / Tätigkeiten / Aufwände der 3 Teams	70
Abbildung 66: Erster Entwurf des Checklistentools mit VBA in Excel 2000	71
Abbildung 67: Zweiter Entwurf des Checklistentools mit Access 2007 und VBA Modulen	72
Abbildung 68: Beziehungen der Tabellen / Datenstruktur	72
Abbildung 69: Heißgasprüfstand während einem Versuchsdurchlauf	74
Abbildung 70: UniPlot Diagramm Manager Tool - Übersicht.....	75
Abbildung 71: UniPlot Diagramm Manager Tool – Einzelne Schritte / GUI Navigation.....	76
Abbildung 72: Sketch of a 3D surface crack	79
Abbildung 73: Crack types (left) and according stress fields (right).....	79
Abbildung 74: Tools Overview.....	80
Abbildung 75: Tools Overview of FM assessment steps	81
Abbildung 76: Tool modularisation	84
Abbildung 77: GUI – Excel interaction.....	84

Abbildung 78 Kogaev's sketch of his equal line proposal 86
Abbildung 79 Evaluate the stress intensity factor at different discrete crack sizes a_d 88
Abbildung 80 : Overview of Kogaev Excel Workbook 89

Referenzen

- [1] Aktuelle Praktikumsrichtlinie 1999/2 für alle Studienanfänger ab WS 1999/2000 und PR-Wechsler; Maschinenwesen, Diplom
- [2] Beurteilungsbogen_Alstom_Fachpraktikum.PDF, Aufgabenaufstellung und Bewertungsbogen für das Fachpraktikum von Johannes Störkle, vom 06.04.2011
- [3] Beurteilungsbogen_ABB_Turbo_Systems_Fertigung_Montage.pdf Zeugnis für den Werkstudentenjob / Ferienjob von Johannes Störkle, vom 30.09.2006
- [4] BMTS-Werkstudentenvertrag_Mai-Okt_2010_Störkle.pdf
- [5] Untersuchung der Sicherheit eines Vierbacken-Spannfutters, 2009, von Johannes Störkle

Quellen

- [abb1]. (22. 04 2006). *ABB Turbocharging*. Von <http://www.abb.ch/turbocharging> abgerufen
- [abb2]. (2006). Turbolader Grundwissen.
- [alsto1]. (15. 05 2011). *Alstom - The worlds leading energy solutions and transport company*. Von <http://www.alstom.com/> abgerufen
- [alsto2]. (22. 05 2011). *Alstom Power*. Von <http://www.alstom.com/power/news-and-events/press-releases/260-million-to-build-Tuas-Power-gas-fired-combined-cycle-power-plant-Singapore/> abgerufen
- [alsto3]. (2010). Alstom - Marketing.
- [badzei1]. (05. 08 2011). *Badische Zeitung - Revision in großem Stil*. Von <http://www.badische-zeitung.de/aargau/revision-in-grossem-stil--34450679.html> abgerufen
- [beonat1]. (01. 04 2011). *Beobachter Natur - Sicherheit auf Tauchstation*. Von http://www.beobachter.ch/natur/umweltpolitik/energiepolitik/artikel/akw-leibstadt_sicherheit-auf-tauchstation/ abgerufen
- [bmts1]. (04. 06 2011). *Startpage Bosch Mahle TurboSystems*. Von <http://www.bmturbosystems.com/> abgerufen
- [ever1]. (06. 28 2011). *GE Inspection Technologies - Everest XLG3 VideoProbe*. Von <http://www.geinspectiontechnologies.com/de/products/rvi/vp/xlg3/overview.html> abgerufen

[ihu1]. (22. 06 2011). *Industriefen- & Härtereizubehör GmbH Unna*. Von http://www.ihu.de/de/news_home.html abgerufen

[kkl1]. (06. 05 2011). *Kernkraftwerk Leibstadt*. Von <http://www.kkl.ch> abgerufen

[kog348]. (1993). *Strength calculations under time variable stresses (in Russia) - Kogaev, M. Mashino Stroenie*. Russia.

[lb1]. (21. 06 2011). *LB Logistikbetriebe AG - Home*. Von <http://www.lb-log.ch/de/home/> abgerufen

[mpa1]. (02. 07 2009). *MPA Stuttgart - 100 online*. Von <http://home.arcor.de/thiessen-berlin/Zerstoeerungsfreie%20Werkstoffpruefung.htm.htm> abgerufen

[mpa2]. (19. 04 2011). *IMWF Uni Stuttgart / MPA*. Von <http://www.imwf.uni-stuttgart.de/home.html> abgerufen

[vattfa1]. (16. 04 2011). *Energie und Services von Ihrem Stromanbieter - Vattenfall*. Von <http://www.vattenfall.de/de/index.htm> abgerufen

[wiki1]. (28. 06 2011). *Wikipedia, Joule Kreisprozess*. Von <http://de.wikipedia.org/wiki/Joule-Prozess> abgerufen

[wiki2]. (22. 04 2011). *Wikipedia - Dampfturbine*. Von <http://de.wikipedia.org/wiki/Dampfturbine> abgerufen