

Technische Universität Chemnitz

Fakultät für Maschinenbau



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Bachelorarbeit

Thema: Experimentelle und simulationsbasierte Ermittlung des Wärmeübergangseinflusses im Stahlbeton von Maschinenbetten

vorgelegt von: Jakub Leischner
geb. am: 03. 04. 1997 in: Brno

Studiengang: Maschinenbau

Berufsfeld: Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

Betreuer: Dr.-Ing. Janine Glänzel
Dr.-Ing. Joachim Regel

Abgabe: 15. 08. 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

EXPERIMENTÁLNÍ A SIMULAČNÍ URČENÍ VLIVU ŽELEZOBETONU NA PŘENOS TEPLA V RÁMECH VÝROBNÍCH STROJŮ

EXPERIMENTELLE UND SIMULATIONSBASIERTE ERMITTLUNG DES WÄRMEÜBERGANGSEINFLUSSES
IM STAHLBETON VON MASCHINENBETTEN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Leischner

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

BRNO 2019

Aufgabenstellung Bachelorarbeit

für Herrn Jakob Leischner

Thema: Experimentelle und simulationsbasierte Ermittlung des Wärmeübergangseinflusses im Stahlbeton von Maschinenbetten

Aufgabenstellung

Die Genauigkeit von WZM wird durch das Verformungsfeld aufgrund von wechselnden und zeitlich abhängigen Temperaturfeldern im Maschinengestell maßgeblich beeinflusst. Für die Entwicklung eines neuen, thermo-energetisch optimierten Maschinenbettes sollen Temperiersysteme für eine Minimierung der einwirkenden Wärmeströme in das Maschinenbett integriert werden. Im ersten Schritt sind die Untersuchungen zum Wärmeübergangsverhalten zwischen Armierung und Beton an einem zylindrischen Minimalmodell inklusive Sensorik zur inneren Erfassung der Temperaturverteilung durchzuführen, welche simulativ und experimentell erfolgen. Hiefür werden vier Probekörper aus jeweils zwei Betonarten (Hydropol „Medium“ und Hydropol „Schwer“ von der Firma Framag GmbH aus Österreich) für die Untersuchung zur Verfügung gestellt. Im Rahmen dieser Arbeit ist die Versuchsplanung, Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung in der Klimazelle zu erarbeiten, um die thermischen Wechselwirkungen im Stahlbeton zu ermitteln. Außerdem ist auszuwerten, welchen Einfluss die Platzierung von Temperatursensoren im Probekörper hat. Hiefür befindet sich ein Sensor in der Nähe eines Armierungsstabs und ein Sensor im inneren des Probekörpers.

Die experimentellen Ergebnisse sind mit einem in Ansys CADFEM Mechanical erstellten Simulationmodell zu vergleichen. Anschließend ist ein Vorgehen zur Übertragbarkeit der Herangehensweise auf ein reales Maschinenbett abzuleiten.

Schwerpunkte der Arbeit

- Literaturrecherche und Stand der Technik zu Maschinengestellen mit dem Schwerpunkt auf Materialien (inklusive Beton und Armierung)
- Aufbau eines experimentellen Versuchstands zur thermischen Vermessung der Probekörper in der Klimazelle
- Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung
- Aufbau eines Simulationsmodells auf Basis von FEM in ANSYS CADFEM
- Validierung und Auswertung des Simulationsmodells mit den Messergebnissen und Ermittlung des Einflusses der Wärmeübergänge im Stahlbeton für die vier Probekörper
- Dokumentation der Ergebnisse

Die Bachelorarbeit ist als Einzelarbeit abzugeben. Die Schwerpunkte können in Absprache mit dem Betreuer an den Arbeitsstand bzw. an die notwendigen Schritte individuell angepasst werden.

Die Arbeit ist unter der Berücksichtigung der Arbeitshinweise zum Erstellen studentischer wissenschaftlicher Arbeiten der Professur Werkzeugmaschinen und Umformtechnik zu verfassen.

Beginn: 01. 07. 2019

Abgabe: 23. 09. 2019

Betreuer: Dr.-Ing. Janine Glänzel
Dr.-Ing. Joachim Regel

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Jakub Leischner
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Výrobní technika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Experimentální a simulační určení vlivu železobetonu na přenos tepla v rámech výrobních strojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přesnost výrobních strojů je značně ovlivněna deformačním polem vznikajícím jako důsledek střídajících se a časově závislých teplotních polí v rámu stroje. Pro vývoj nového, tepelně–energeticky optimalizovaného lože výrobního stroje je vhodné použití systému temperování umístěného v loži pro minimalizaci působících tepelných toků. V první fázi budou provedeny zkoumání za účelem zjištění chování přenosu tepla na rozhraní armování a betonu na válcových zkušebních modelech obsahujících zabudované snímače na určování vnitřní teploty. Pro tyto účely byly k dispozici čtyři vzorky ze dvou různých betonů (Hydropol „Medium“ a Hydropol „Schwer“ od Firmy Framag GmbH z Rakouska). V rámci této práce budou v klimatické komoře (Klimazelle) provedena a následně vyhodnocena měření s cílem určení vzájemného tepelného vlivu v železobetonu. Součástí práce je i vyhodnocení závislosti naměřené teploty na umístění senzoru ve vnitřní části vzorků. Jeden senzor se nachází v blízkosti armování, zatímco druhý ve střední části. Experimentálně zjištěné výsledky budou porovnány se simulací vytvořenou v programu Ansys CADFEM Mechanical. Ze zjištěných výsledků budou vyvozeny závěry pro další využití a možné další aplikace.

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Blecha, PH.D. (VUT v Brně), Dr.–Ing. Janine Glänzel (Fraunhofer IWU), Dr.–Ing. Joachim Regel (TU Chemnitz)

Cíle bakalářské práce:

Popis současného stavu techniky o rámech výrobních strojů s důrazem na používané materiály (včetně betonu a armování).

Příprava měřicího stanoviště k teplotnímu měření zkušebních vzorků v klimatické komoře.

Průběh pokusů a vyhodnocení výsledků.

Příprava simulace na bázi MKP v programu ANSYS CADFEM.

Vyhodnocení výsledků simulace, porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami a určení vlivu armování na přenos tepla ve vzorcích.

Dokumentace výsledků.

Seznam doporučené literatury:

DIN EN 206. Beton: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Berlín: Beuth-Verlag, 2017.

DIN EN 60751. Industrielle Platin: Widerstandsthermometer und Platin-Tempertursensoren. Berlín: Beuth-Verlag, 2009.

BERNHARD, Frank. Handbuch der Technischen Temperaturmessung. 2. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2014. ISBN 978-3-642-24505-3.

ÇENGEL, Yunus A. a Michael A. BOLES. Thermodynamics: an engineering approach. Eighth edition. New York: McGraw-Hill Education, [2015]. ISBN 978-0-07-339817-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

Bibliographische Beschreibung und Kurzreferat

Leischner, Jakob:

Experimentelle und simulationsbasierte Ermittlung des Wärmeübergangseinflusses im Stahlbeton von Maschinenbetten

Bachelorarbeit an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Professur Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz, 2019

97 Seiten, 52 Abbildungen, 16 Tabellen, 10 Anlagen, 43 Quellen

Schlagwörter:

Wärmeübertragung, FEM, Stahlbeton

Die Bachelorarbeit beschäftigt sich mit experimentellen- und simulationsbasierten Untersuchungen des Wärmeübergangsverhaltens zwischen Armierung und Beton an einem zylindrischen Minimalmodell. Das Prinzip der Messung besteht darin, dass die Probekörper paarweise (laut der Art des Betons: Hydropol „Medium“ und Hydropol „Schwer“) geteilt, mit Temperatursensoren ausgerüstet und in der Klimazelle mithilfe von Heizmatten erwärmt werden. Danach folgt ein Abkühlvorgang.

Parallel dazu wird ein Simulationsmodell auf Basis von FEM in ANSYS CADFEM aufgebaut. Zum Prüfen und Validieren des Simulationsmodells werden die gemessenen Daten verwendet. Davon wird der Einfluss der Wärmeübergänge im Stahlbeton ermittelt.

Die erhaltenen Ergebnisse werden zusammengefasst und ein Vorgehen zur Übertragbarkeit der Herangehensweise auf ein reales Maschinenbett wird abgeleitet.

Bibliografický záznam a abstrakt

Tschechisch/Česky

LEISCHNER, Jakub. *Experimentální a simulační určení vlivu železobetonu na přenos tepla v rámech výrobních strojů*. [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-08-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/121606>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

Klíčová slova:

Přenos tepla, MKP, železobeton

Bakalářská práce se zabývá experimentálním a simulačním zkoumáním chování přenosu tepla na rozhraní armování a betonu na zmenšeném válcovém modelu. Měřené vzorky byly rozděleny po párech (dle druhu betonu - Hydropol „Medium“ a Hydropol „Schwer“), opatřeny senzory k průběžnému zaznamenávání teploty a byly pomocí zahřívacích podložek ohřívány v klimatické komoře („Klimazelle“). Následovalo samovolné ochlazování. Souběžně s měřením byla vytvořena simulace na základě MKP v programu ANSYS CADFEM. Výsledky ze simulace jsou ověřeny a zhodnoceny pomocí dat zjištěných z měření. V dalším kroku jsou stanoveny vlivy tepelných pochodů v železobetonu. Zjištěné výsledky jsou sepsané a s jejich pomocí je odvozeno využití a možné další aplikace.

Abstract

Englisch/English

Leischner, Jakob:

Experimental and simulation-based determination of the heat transfer influence in reinforced concrete of machine beds

Bachelor thesis at the Faculty of Mechanical Engineering; Chemnitz University of Technology; Institute of Machine Tools and Forming Technology, Chemnitz, 2019

97 pages, 52 figures, 16 tables, 10 annex, 43 sources

Keywords:

Heat transfer, FEM, Reinforced concrete

The bachelor thesis deals with experimental and simulation-based investigations of the heat transfer behavior between reinforcement and concrete on a cylindrical minimal model. The principle of the measurement is that the samples are split in pairs (according to the type of concrete: Hydropol „Medium“ and Hydropol „Schwer“), equipped with temperature sensors and heated in the climate cell with the help of heating mats. This is followed by a cooling process. At the same time, a simulation model based on FEM is being set up in ANSYS CAXFEM. The measured data are used to test and validate the simulation model. From this, the influence of heat transfer in reinforced concrete is determined. The results obtained are summarized and a procedure for the transferability of the approach to a real machine bed is derived.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben. Besonderen Dank gilt vornehmlich:

- Frau Dr.-Ing. Janine Glänzel für ihre erstklassige Betreuung und herzliche Unterstützung während meiner Zeit im Unternehmen und Herrn M.sc. Alexander Geist für seine Hilfe und Bereitschaft alle gestellte Fragen zu beantworten
- Herrn Dr.-Ing. Joachim Regel vom IWP der TU Chemnitz für seine professionelle Betreuung und Unterstützung
- Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Hirsch, Herrn doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. und Herrn Dr.-Ing. Thomas Hänel für ihre Betreuung und Unterstützung während des Studiums und für ihr Engagement im Zusammenhang mit dem deutsch-tschechischen Doppel-Diplom-Bachelorstudiengang „Produktionstechnik“.
- Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Inhaltsverzeichnis

Bibliographische Beschreibung und Kurzreferat	I
Bibliografický záznam a abstrakt	II
Abstract	III
Danksagung	IV
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Motivation und Zielstellung	1
1.1 Motivation und Einleitung	1
1.2 Zielstellung	2
1.3 Transferprojekt T02	2
2 Stand der Technik	4
2.1 Definition von Maschinengestellen	4
2.1.1 Funktion, Ausführungen, Eigenschaften	4
2.1.2 Beispiele von Maschinengestellen	6
2.2 Materiallien von Maschinengestellen	7
2.2.1 Werkstoff Beton	7
2.2.2 Stahlbeton und Armierung	10
2.2.3 Polymerbeton/Mineralguss	11
2.2.4 HPC	11
2.2.5 Grauguss und Stahlguss	12
2.2.6 Vergleich Materialien	12
2.3 Thermomechanische Grundlagen	13
2.3.1 Grundlagen der Thermodynamik	13
2.3.2 Wärmeübertragung (Thermokinematik)	15
2.4 Thermisches Verhalten von WZM	18
2.4.1 Wärmequelle bei der WZM	18
2.4.2 Maßnahmen zur Beeinflussung des thermischen Verhaltens	20
2.5 Numerische Lösungsansätze	21
2.5.1 FEM Grundlagen	21
2.5.2 FEM Grundgleichung	22

2.5.3	FEM für thermisches Problem	22
2.6	Präzisierung der Aufgabenstellung	23
3	Probekörper	24
3.1	Betonprobe	25
3.2	Armierte Probe	25
3.3	Sensorpositionen	26
3.3.1	Betonprobe	26
3.3.2	Armierte Probe	27
4	FEM-Simulation	28
4.1	Simulationsaufbau	29
4.1.1	Technische Daten	29
4.1.2	Geometrie	29
4.1.3	Vernetzung und Kontaktbereiche	31
4.2	Randbedingungen und thermische Belastung	33
5	Experimentelle Untersuchung der Probekörper	37
5.1	Messtechnik	37
5.1.1	Klimazelle	37
5.1.2	Mineralguss Hydropol	39
5.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	40
5.2.1	Vorbereitung	41
5.2.2	Messdurchführung	43
6	Auswertung der Ergebnisse	45
6.1	Versuchsauswertung	45
6.1.1	Messunsicherheiten	45
6.1.2	Herangehensweise	47
6.1.3	Probekörper Hydropol „Medium“	47
6.1.4	Probekörper Hydropol „Schwer“	51
6.2	Auswertung der Simulation	54
6.2.1	Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizient	54
6.2.2	Hydropol „Medium“	55
6.2.3	Hydropol „Schwer“	59
7	Vergleich Messung und Simulation	65
7.1	Hydropol „Medium“	66
7.1.1	Probe mit der Armierung	66
7.1.2	Probe ohne Armierung	68
7.2	Hydropol „Schwer“	69
7.2.1	Probe mit der Armierung	69
7.2.2	Probe ohne Armierung	70
8	Zusammenfassung und Ausblick	72
8.1	Zusammenfassung	72
8.2	Ausblick	73

9	Shrnutí práce v českém jazyce	75
9.1	Úvod a stanovení cílů	75
9.2	Stav poznání	75
9.3	Vzorky	76
9.4	Simulace	77
9.5	Experimentální zkoumání vzorků	77
9.6	Vyhodnocení získaných dat	78
9.6.1	Výsledky experimentu	78
9.6.2	Výsledky simulace	78
9.7	Porovnání experimentu a simulace	79
9.8	Závěr a výhled	79
9.8.1	Shrnutí	79
9.8.2	Výhled	80
10	Anlagenverzeichnis	82
11	Anhang	83
11.1	Messverstärker QuantumX MX840B	83
11.2	Temperatursensor Pt100	84
11.2.1	Eigenschaften	84
11.2.2	Pt100-Messschaltungen	85
11.2.3	Mögliche Messfehler und Messungenauigkeit	86
11.2.4	Eingegossene Sensoren	87
11.3	Messunsicherheiten	87
11.3.1	Leitungswiderstand	87
11.3.2	Gesamtmessunsicherheit	87
	Literaturverzeichnis	94
	Selbstständigkeitserklärung	97

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A_L	m^2	Querschnitt des Leiters
A	m^2	Fläche
c	$J/(kg \cdot K)$	Spezifische Wärmekapazität
C	–	Kapazitätsmatrix
$\varnothing d$	m	Durchmesser
E	MPa	E-Modul
f	Hz	Messfrequenz
F	–	Matrix der bekanntenen Kräften
I	A	Elektrische Strom
k	–	Werkstoffdämpfung
k	–	Steifigkeitsmatrix
m	kg	Gewicht
P_{el}	W	Elektrische Leistung
P_s	W	Strahlungsleistung
\dot{q}	W/m^2	Wärmestromdichte
Q	J	Wärme
\dot{Q}	W	Wärmestrom
Q	–	Wärmelastvektor
R_0	Ω	Widerstand bei $0^\circ C$
R_e	N/mm^2	Streckgrenze

Symbol	Einheit	Bezeichnung
R_{tL}	Ω	Widerstand des Leiters bei gem. Temperatur
t_{max}	$^{\circ}C$	Maximale gemessene Temperatur
t	$^{\circ}C$	Temperatur
T_{anf}	K	Anfangstemperatur
T_{end}	K	Endtemperatur
$T_1, T_2, T_{B,innen}$	–	Innentempertursensoren
T_{Ar}	–	Temperatursens. - Reihe mit Armierung
$T_{Ar,n}$	–	Temperatursens. - Reihe neben der Armierung
T_{Fl}	K	Fluidtemperatur
T_{HM}, T_{HMB}	–	Temperatursens. - an der HM
T_{oh}	–	Temperatursens. - Reihe ohne Armierung
T_u, T_{uB}	–	Temperatursens. - untere Seite
T_W	K	Wandtemperatur
T	K	Absolute Temperatur
\mathbf{T}	–	Temperaturvektor
$\dot{\mathbf{T}}$	–	Temperaturgradientenmatrix
S	J/K	Entropie
U	V	Elektrische Spannung
α_K	K^{-1}	Wärmeausdehnungskoeffizinet
α	$W/(m^2 \cdot K)$	Wärmeübergangskoeffizient
γ	N/m^3	Spezifische Gewicht
Δt_{ges}	$^{\circ}C$	Gesamtmessfehler der gemessenen Temperatur
$\Delta t_{Gen,B}$	$^{\circ}C$	Messunsicherheit der Genauigkeitsklasse B bei gemessener Temperatur
Δt_{max}	$^{\circ}C$	Messunsicherheit durch den Leiter bei gemessener Temperatur
Δt_{msv}	$^{\circ}C$	Messunsicherheit des Messverstärkers bei gemessener Temperatur
λ	$W/(m \cdot K)$	Spezifische Wärmeleitfähigkeit
$\boldsymbol{\lambda}$	–	Gesamtleitfähigkeitsmatrix
ρ_0	$(\Omega \cdot mm^2)/m$	Spezifischer Widerstand bei $0^{\circ}C$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ρ_{tL}	$(\Omega \cdot mm^2)/m$	Spezifischer Widerstand bei gemessener Temperatur
ρ	kg/m^3	Dichte
σ	$W/(m^2 \cdot K^4)$	Stefan-Boltzmann-Konstante
τ	s	Zeit
\angle	$^\circ$	Winkel

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
CAD	Computer aided design
CFD	Computational fluid dynamics
DIN	Deutsche Institut für Normen
EN	Europäische Normen
eniPROD	Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovation in der Produktionstechnik → http://www.eniprod.tu-chemnitz.de/
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FEM	Finite-Elemente-Methode
HM	Heizmatte
HPC	High Performance Concrete
KS	Koordinatensystem
REM	Randelementenmethode
SFB/TR 96	Sonderforschungsbereich Transregio 96
UHPC	Ultra-High Performance Concrete
UV	Ultraviolettstrahlung
WZM	Werkzeugmaschine

Abbildungsverzeichnis

1.1	eniProd Maschinengestell Überblick	3
1.2	Temperiersysteme der eniProd Maschinegestell	3
2.1	Gestellformen (<i>blau</i> : Führungen) [3]	5
2.2	Beispiele von Bettgestell und L-Gestell	6
2.3	Beispiele von C-Gestell und Portalgestell	6
2.4	Querschnitt von Beton und Stahlbeton	7
2.5	Arten von thermodynamisches System [22]	14
2.6	Erwärmung einer Kugelgewindespindel [26]	19
2.7	Beispiel einer Messung des thermischen Verhaltens [2]	20
3.1	Modell beider Proben mit HM und Beschwerungsplatte	24
3.2	Armierte Probe Stäbe Positionierung	25
3.3	Dimensionen und Innensensorpositionen der armierte Probe	26
3.4	Sensorpositionen Prüfkörper ohne Armierung	27
3.5	Sensorpositionen Prüfkörper mit Armierung	27
4.1	Aufbau der Simulation in Ansys Workbench	29
4.2	Strukturbäume beider Proben	30
4.3	Kontakte/Verbindungen beider Proben	31
4.4	Vernetzung beider Proben	32
4.5	Vernetzung der Armierung	34
4.6	Zugefügte Koordinatensysteme beiden Proben	34
4.7	Verlauf der Temperatur an der HM	35
4.8	Markierung der Randbedingungen bei der armierten Probe	36
5.1	Versuchslabor Klimazelle [34]	38
5.2	Blick auf Messarbeitsplatz mit Probekörpern	41
5.3	Aufbringen der Sensoren auf die armierte Probe	41
5.4	Einfügen der armierte Probe und der Isolierung	43
5.5	Probe mit Sensorik und Isolierung	44
6.1	Temperaturverlauf Hydropol „Medium“ mit der Armierung	48
6.2	Temperaturverlauf Hydropol „Medium“ ohne Armierung	49
6.3	Vergleich T_u und T_{uB} Hydropol „Medium“	50
6.4	Temperaturverlauf Hydropol „Schwer“ mit Armierung	51
6.5	Temperaturverlauf Hydropol „Schwer“ ohne Armierung	53
6.6	Vergleich T_u und T_{uB} Hydropol „Schwer“	54
6.7	Temperaturen bei der armierten Probe Hydropol „Medium“ (28 000 s)	55

6.8	Wärmestromdichte armierte Probe Hydropol „Medium“ (28 000 s) . . .	56
6.9	Temperaturverlauf Simulation bei der armierte Probe Hydropol „Medium“	57
6.10	Temperaturen bei der Betonprobe Hydropol „Medium“ (28 000 s) . . .	58
6.11	Wärmestromdichte Betonprobe Hydropol „Medium“ (28 000 s)	58
6.12	Temperaturverlauf Simulation bei der Betonprobe Hydropol „Medium“	59
6.13	Temperaturen bei der armierten Probe Hydropol „Schwer“ (28 000 s) .	60
6.14	Wärmestromdichte armierte Probe Hydropol „Schwer“ (28 000 s) . . .	60
6.15	Temperaturverlauf Simulation bei der armierten Probe Hydropol „Schwer“	61
6.16	Temperaturen bei der Betonprobe Hydropol „Schwer“ (28 000 s)	62
6.17	Wärmestromdichte Betonprobe Hydropol „Schwer“ (28 000 s)	63
6.18	Temperaturverlauf Simulation bei der Betonprobe Hydropol „Schwer“ .	64
7.1	Vergleich der Temperaturen der armierten Probe Hydropol „Medium“ Simulation und Messung	67
11.1	Universal-Messverstärkermodule QuantumX MX840B [40]	83
11.2	Genauigkeitsklassen von Pt100 [41]	85
11.3	Pt100 Zweileiterschaltung [42]	85
11.4	Pt100 Dreileiterschaltung [42]	86
11.5	Pt100 Vierleiterschaltung [42]	86
11.6	Eingegossener Sensor [43]	87

Tabellenverzeichnis

2.1	Kategorie von Beton laut Trockenrohddichte	9
2.2	Vorteile und Nachteile von HPC [19]	12
2.3	Vergleich verschiedener Gestellmaterialien [2]	12
2.4	Wärmeleitfähigkeit verschiedenen Stoffen [21]	16
2.5	Maßnahmen zur Beeinflussung des thermisches Verhaltens [27]	21
4.1	In der Simulation verwendete Materialien	29
4.2	Anzahl der Knoten und Elementen für einzelne Proben	33
5.1	Technische Daten Klimazelle [34]	38
5.2	Werkstoffkenndaten Grauguss, Stahl und Hydropol [38]	39
5.3	Arten von Hydropol [36]	40
5.4	Zuordnung der Sensoren zu den Messkanälen	42
5.5	Testen zur Bestimmung geeignete Wärmelast	42
6.1	Leitwerten [$W/(m^2 \cdot K)$] zwischen einzelnen Körpern	55
7.1	Vergleich der Temperaturen aus der Messung und Simulation des Hydropol „Medium“	66
7.2	Vergleich der Temperaturen aus der Messung und Simulation des Hydropol „Schwer“	69
11.1	Genauigkeitsklassen von Pt100 laut [39]	84

Kapitel 1

Motivation und Zielstellung

1.1 Motivation und Einleitung

Werkzeugmaschinen (WZM) werden als eine der wichtigsten Maschinen aufgefasst. Nur mithilfe von WZM können andere Maschinen, Bauteile usw. hergestellt werden und die Produktivität eines Unternehmens gesichert werden. In der Wirtschaft dient Qualität des Produkts als ein Kennzeichen Vertrauliches Firma/Betrieb. Um die Werkstücke mit höherer Qualität zu herstellen, spielt die Genauigkeit eine sehr wichtige Rolle. Bessere Genauigkeit ermöglicht uns komplizierte, komplexe und auch kostengünstiger Werkstücke zu produzieren.

Die Genauigkeit von WZM hat eine hohe wirtschaftliche Bedeutung. Größter Einfluss auf die Genauigkeit hat thermisches Verhalten von WZM (d. h. innere und äußere Wärmequelle). Dadurch entstehen wechselnde und zeitlich abhängige Temperaturfelder, die zu den Verformungen im Maschinengestell und zur verringerten Genauigkeit führen. Verringerte Genauigkeit führt zu niedriger Wirtschaftlichkeit. Andere Fehlerarten (statisch und dynamisch) wurden schon kompensiert.

Es existieren Maßnahmen zur Reduktion dieser Fehler. Eine ist Verwendung des Werkstoffs mit günstigeren thermischen Eigenschaften als gewöhnlicher Stahl wie Grauguss, Mineralguss bzw. Beton oder Sandwichkonstruktion (Kombination von Stahlschweißkonstruktion und Füllstoff). Andere Möglichkeit ist thermisch-symmetrische Konstruktion beachten oder ein System, das konstante Temperaturverhalten (d. h. entweder durch Kühlung oder geregelte Heizung, sogenannte Temperierung) gewährleistet. Alle diese Maßnahmen helfen, das geeignete Temperaturverhalten zu erreichen, was führt zu der Senkung von thermisch bedingten Fehlern.

Heutzutage kommen sogenannte Computer aided design (CAD) und Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Anwendung. Mithilfe von diesen können alle notwendigen Teile vorher im 3D konstruiert und notwendige Simulationen (wie thermisches Verhalten, aber auch alle Belastungen schon in der Entwurfsphase zu prüfen) durchzuführen. Deshalb können kritische Stellen und mögliche Fehlerquellen erkannt und davon abgeleitete Maßnahmen implementiert werden.

1.2 Zielstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Einschätzung der thermischen Eigenschaften von Hydropol „Medium“ und „Schwer“ (insbesondere die Wärmeleitfähigkeit), Ermittlung des Wärmedurchgangs einer Hydropolprobe und Bewertung der möglichen Auswirkungen der Armierung. Erst wurde die Simulation und danach die Messung beschrieben. Die Unterschiede zwischen Probe mit und ohne Armierung werden betont und berücksichtigt. Dies gilt auch für einzelne Arten der Proben (Hydropol Medium und Schwer). Unterschiede, die durch Simulation und Messung festgestellt wurden, sind das Hauptergebnis dieser Arbeit.

1.3 Transferprojekt T02

Dieses Projekt gehörte zu den Sonderforschungsbereich Transregio 96 (auch kurz SFB/TR 96 bezeichnet). Es geht um eine Kooperation von 3 Universitäten (RWTH Aachen University, Technische Universität Dresden und Technische Universität Chemnitz).

Im Bereich der Thermo-energetische Gestaltung von WZM. Ziel oder Vision ist laut [1] „Erreichen eines Optimums bei Gestaltung und Betrieb von WZM unter den Gesichtspunkten von Energieeinsatz und Fertigungsqualität hinsichtlich thermischer Ursachen und Wirkungen unter stark variierenden Prozessanforderungen, Einsatz- und Umgebungsbedingungen.“

- weniger Energie (**E** ↓)
- mehr produktive Leistung (**P** ↑)
- gesteigerter Fertigungsqualität (**Q** ↑)

SFB/TR 96 basiert auf 3 Phasen (Basisphase, Integrationsphase und Demonstrationsphase), zur Zeit läuft die dritte Phase [1].

Dazu existieren 4 Projektbereiche mit unterschiedlichen Ausrichtungen [1].

- A: Prozessaktuelles Werkzeugmaschinenabbild
- B: Parametrierung und Korrektur
- C: Komponenten- und Maschinengestaltung
- T: Transferprojekte

Untersuchungen, die in diese Arbeit durchgeführt werden, gehören zu T02: *Robuste und thermo-energetisch optimierte Temperierung von Werkzeugmaschinenstellen mittels fluidtechnischer Systeme (Kurztitel: Effiziente Gestelltemperierung)*. Das Ziel des Transferprojekts ist laut [1] „die thermo-energetische Optimierung von Temperaturkreisläufen in Gestellstrukturen von WZM aus Mineralbeton.“ Mit dem Fokus auf der „Sicherung und Verbesserung der thermischen Stabilität.“

Während dieses Teilprojekts wurde ein Maschinengestell (eniProd Maschinengestell), der Abb. 1.1 zeigt, zur Verfügung gestellt. Auf diese Maschine wurde eine Methodik zur optimalen Auslegung, Integration und Regelung der Temperiersysteme, die auf der Abb. 1.2 zu sehen sind, erarbeitet [1].

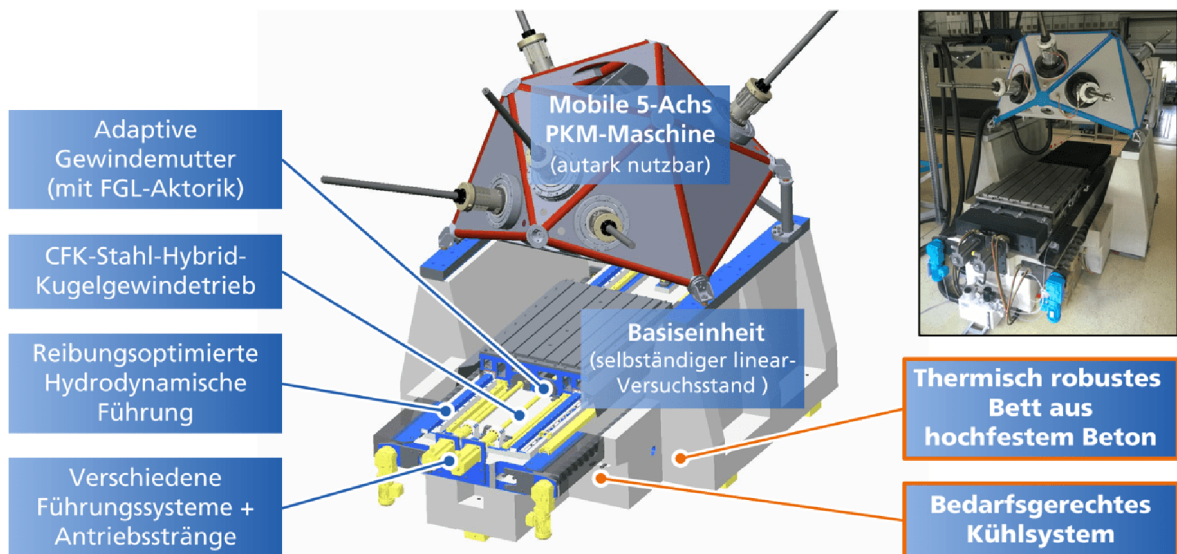


Abbildung 1.1 eniProd Maschinengestell Überblick

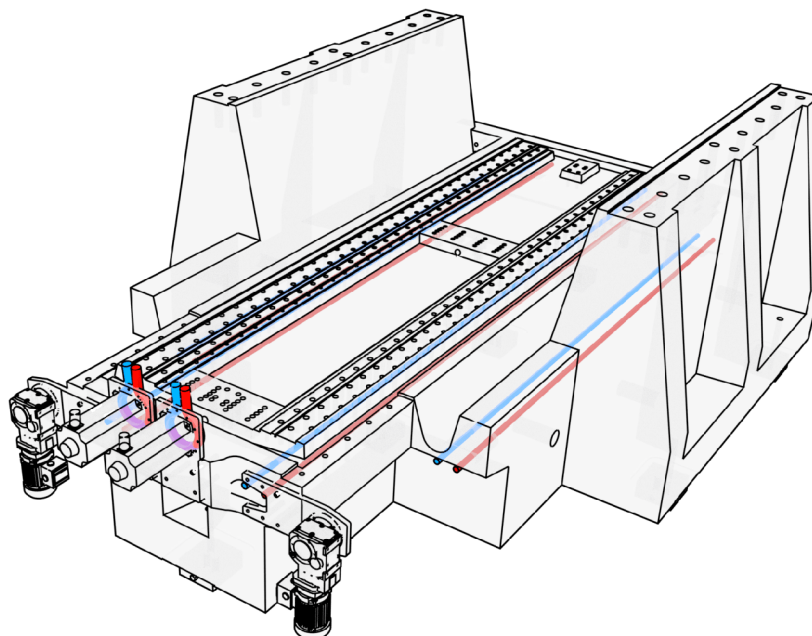


Abbildung 1.2 Temperiersysteme der eniProd Maschinengestell

Kapitel 2

Stand der Technik

Der Stand der Technik beschäftigt sich mit dem heutigen Zustand von Informationen, die zum Verstehen dieser Arbeit notwendig sind, und die Inhalte von bestehenden Arbeiten abgrenzt. Zuerst werden Maschinengestellen mit Schwerpunkt auf verwendete Werkstoffe vorgestellt. Dann die thermodynamischen Grundlagen und den Zusammenhang mit Genauigkeit von WZM. Letzte Teil beschreibt die FEM und ihre Anwendungen.

2.1 Definition von Maschinengestellen

Heutzutage werden viele verschiedene Anforderungen an WZM gestellt, um die zu realisierende Funktionen erfolgreich eingefüllt werden können. Deshalb werden WZM in kleinere Teilen (sogenannte Baugruppen) eingeteilt, die ermöglichen effektive Gestaltung ganze WZM. [2]

Die Aufteilung der WZM in Baugruppen erfolgt nach folgenden Kriterien: Funktion, Fertigung, Montage und anderen. Nach der zu erfüllende Funktion werden nächste Baugruppen definiert [2]:

- Maschinenaufstellung einschließlich Fundament
- Gestellbauteile wie Betten, Ständer, Schlitten, Traversen, Tische u. a.
- Hauptspindelbaugruppe
- und Andere

Im Rahmen dieser Arbeit werden Gestellbauteile und deren Eigenschaften besprochen. Für das weitere Studium zur Thematik ist [2] zu empfehlen.

2.1.1 Funktion, Ausführungen, Eigenschaften

Funktion

Die Aufgabe der Gestellbauteile ist die Aufnahme und Sicherung der gegenseitigen Lage der WZM-Baugruppen bei allen Betriebsbedingungen. Einfach gesagt, sie halten alle Teilen von WZM zusammen. Mit Gestellbauteilen werden damit die Genauigkeit (exakte Zuordnung der Bewegungsachsen zueinander) und das Leistungsvermögen der Maschine wesentlich beeinflusst und gewährleistet. [2, 3]

Dafür müssen die gute statische, dynamische und thermische Verhalten aufweisen. Bei der Gestaltung beiträgt auch kostengünstige Fertigung und Montage sowie effektiven Materialeinsatz zur hohen Wirtschaftlichkeit der Maschine. [2]

Ausführungen

Man teilt die Bauweise den Gestellen hinsichtlich des Kraftflusses. [2]

- Offene Bauweise
 - Bettgestell (nur aus Grundplatte)
 - Winkelgestell (z. B. L-Gestell: aus Grundplatte und Ständer)
 - C-Gestell (aus Grundplatte, Ständer und Ausleger)
- Geschlossene Bauweise
 - Portal-, Tor- oder Rahmengestell (O-Form: aus Grundplatte, Ständer und Joch)

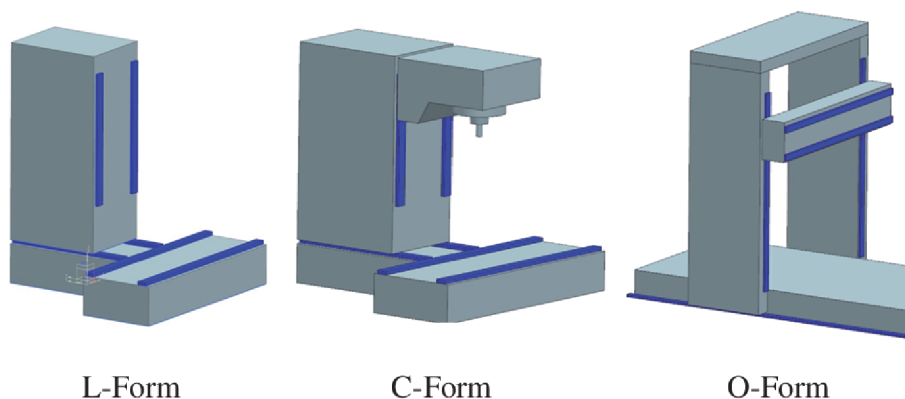


Abbildung 2.1 Gestellformen (*blau*: Führungen) [3]

Vorteil der offenen Bauweise ist bessere Zugänglichkeit, dagegen steht Aufbiegung der Struktur beim Wirken von Bearbeitungskräften (größere Verformung).

Eigenschaften

Als schon erwähnt, die wichtigste und gewünschte Eigenschaften (und die die Genauigkeit wesentlich beeinflussen), die Gestelle zeigen müssen sind laut [3]:

- ausreichende statische Steifigkeit
- ausreichende dynamische Steifigkeit
- thermisch günstiger Konstruktion

Weitere Anforderungen sind zudem [3]:

- gutes Verschleißverhalten (Verschleiß an der Gestellführungsbahn soll kleiner sein als der Verschleiß an der Führungsbahn der beweglichen Elemente, da an den beweglichen Teilen die Nacharbeit einfacher ist)

- ungehinderte Späneabfuhr
- möglichst geringes Gewicht
- ergonomische Gestaltung

Um diese spezifische Anforderung erfüllen zu können, werden unterschiedliche Materialien zur Herstellung von Gestellen eingesetzt.

2.1.2 Beispiele von Maschinengestellen

Dank vielfältige Anforderungen an WZM findet jeder Art der Bauweise den Gestellen entsprechenden Gebrauch.



(a) Drehmaschine [4]



(b) Horizontale Fräsmaschine [5]

Abbildung 2.2 Beispiele von Bettgestell und L-Gestell



(a) Bearbeitungszentrum [6]



(b) Vertikale Drehmaschine [7]

Abbildung 2.3 Beispiele von C-Gestell und Portalgestell

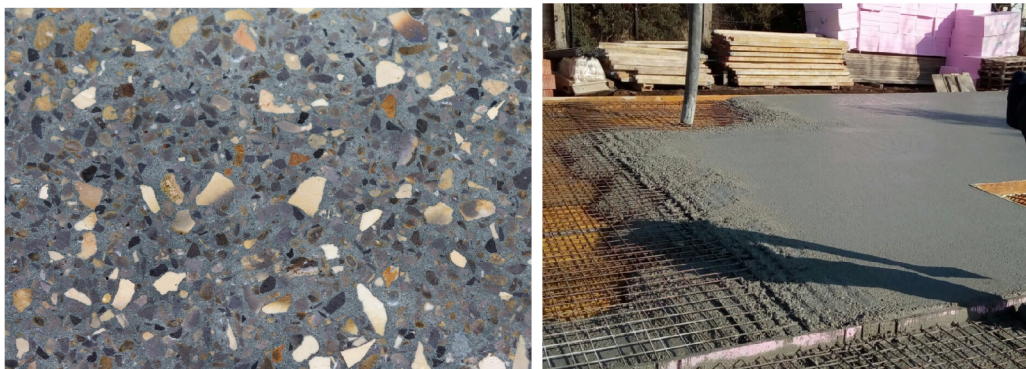
2.2 Materialien von Maschinengestellen

Heutzutage werden in der Maschinenbauindustrie viele verschiedene Materialien als eine Alternative zur Stahl zur Werkzeugmaschinenherstellung (nämlich Maschinenfundamente, Maschinenbetten oder Maschinengestelle) eingesetzt. Diese Unterkapitel bietet einen Übersicht über meistverwendete Werkstoffe und deren Eigenschaften.

2.2.1 Werkstoff Beton

Beton ist heutzutage meist verbreiteter Baustoff. Hauptanwendung für Beton ist als Verbundwerkstoff in Kombination mit einer Armierung (auch Bewehrung genannt), die Zugfestigkeit von Gemisch erhöhen. Diese Kombination wird Stahlbeton bzw. Spannbeton genannt. In letzter Zeit wurden neue Kombination wie Faserbeton (Stahl-, Kunststoff- oder Glasfasern) oder Textilbeton (enthält AR-Glas oder Kohlenstofffasern) erfunden. [8]

Erster Vorgänger von Beton wurde schon in der Antike und bei dem Ägypter erfunden. In der Neuzeit wurde moderner Beton im 1756 durch John Smeaton entwickelt. Er ermittelt bei seiner Versuche, dass ein bestimmter Anteil von Kalk an Ton zur Erfüllung der Wasserbeständigkeit erforderlich ist. Nächster wichtiger Schritt war die Erfindung des Stahlbetons durch Joseph Monier (1867). [9]



(a) Zusammensetzung von Beton [10] (b) Stahlbeton [11]

Abbildung 2.4 Querschnitt von Beton und Stahlbeton

Bei Verwendungen von Beton werden zwei Einsatzgebiete bevorzugt, d. h. reine Maschinenbauteile aus Zementbeton oder kalterhärtende Vergussmasse für Hybrid- oder Sandwichkonstruktionen (Beton wird im Voraus in vorbereitete hohle Stahlkonstruktion eingegossen). [12] Sandwichkonstruktionen weist im Vergleich mit Stahl höheren Dämpfung (Schwindungsamplituden werden verringert), Wärmeträgheit und geringerer Wärmegang (d. h. bessere Thermostabilität) auf. Maschinenbauteile werden auch ausgesteift. [3]

Zusammensetzung

Laut [13] sind folgende Komponenten im Beton enthalten. Die Komponenten werden als Ausgangsstoffe bezeichnet. DIN EN 206-1/DIN EN 1045-2 sind nur für Normal-, Schwer-, Leicht-, Hochfester und Spannbeton anwendbar.

Für alle an der Betonherstellung beteiligte Komponenten gelten eigene Normen, die alle benötigte Information und Regeln, die erfüllen werden müssen, enthalten, z. B. für Zement ist es die Norm DIN EN 197-1. Grundlegende Informationen für alle Ausgangsstoffe werden auch in den Normen [13] notiert

- Zement
- Gesteinskörnungen
- Zugabewasser
- Zusatzmittel
- Zusatzstoffe (einschließlich Gesteismehl und Pigmente)
- Fasern (Stahl, Polymer,...)

Einteilung, Anforderungen und Festlegung

Weil Beton ein Stoff mit vielfältigen Anwendungen ist, wurde man viele verschiedene Arten zur unterschiedlichen Zwecken und mit besonderen Eigenschaften hergestellt und festgelegt. Jede Art von Beton eignet sich für spezifischen Einsatz. Deshalb wurde die Klasseneinteilung in [13] eingeführt. Dazu wurden noch zu Sicherstellen der Qualität und Erfüllung der Betoneigenschaften die Anforderungen an Beton und Festlegung von Beton getrennt definiert.

- Klasseneinteilung [13]
 - Expositionsclassen und Feuchtigkeitsclassen
 - Konsistenzclassen
 - Druckfestigkeitsclassen
 - Classen nach dem Größtkorn der Geisteinskörnung
 - Rohdichteklassen bei Leichtbeton
- Anforderungen an Beton - Alle Anforderungen werden in der entsprechenden Norm festgestellt [13]
 - an die Ausgangsstoffe
 - an Beton in Abhängigkeit von den Expositionsclassen
 - an den Mehlkorngehalt
 - an den Luftgehalt bei Frost- und Frost-Tausalzangriff
 - usw.
- Festlegung von Beton - Beton ist entweder als Beton nach Eigenschaften oder als Beton nach Zusammensetzung festzulegen. Die unterschieden sich durch Verantwortlichkeiten an Verfasser der Festlegung, Hersteller und Verwender. Dieser Übersicht ist in [13] zu finden. Dazu gibt noch Möglichkeit einer Festlegung als Standardbeton.

- nach Eigenschaften (grundlegende wie Expositionsklassen und Feuchtigkeitsklasse und zusätzliche wie Frischbetontemperatur)
- nach Zusammensetzung (grundlegende wie Zementart und Festigkeitsklasse und zusätzliche wie Herkunft aller Ausgangsstoffe)
- Standardbeton (exakte Vorgabe für den Anwendungsbereich gegeben)

Allgemeine Eigenschaften

Wie schon erwähnt, weist Beton viele verschiedene und besondere Eigenschaften, die noch verändert werden können. Dies führt dazu, dass Beton für vielfältige Einsatzgebiete geeignet ist. Trotzdem zeigen alle Arten von Beton gleiche grundlegende Eigenschaften. Die sind noch unterschiedlich für Leichtbeton und Normal- bzw. Schwerbeton. Für Leichtbeton wurden Ausnahmen festgelegt. Die Differenz zwischen diesen drei Kategorien liegt bei verschiedenen Trockenrohdichten. [14]

Tabelle 2.1 Kategorie von Beton laut Trockenrohdichte

Leichtbeton [kg/m^3]	Normalbeton [kg/m^3]	Schwerbeton [kg/m^3]
800 – 2000	2000 – 2600	> 2600

Unten genannte allgemeine Eigenschaften werden auf Normal- und Schwerbeton bezieht. [14]

- hohe Druckfestigkeit
- der Korrosionsschutz der empfindlichen Bewehrung
- gute brandschutztechnische Eigenschaften
- Wasserundurchlässigkeit und Schutz vor Feuchtigkeit
- Freie Formbarkeit
- hoher Widerstand bei chemischen Angriffen, hoher Strahlenschutz
- hoher Widerstand bei Temperaturen bis 250 °C
- hoher Verschleißwiderstand der Oberflächen
- große Gestaltungsmöglichkeit in der Oberflächenausbildung

Beton zeigt nicht nur Vorteile, aber mit Verwendung der Betonfolgen auch die Nachteile der Beton. Diese können mit passende Maßnahmen vermindert werden. [14]

- zusätzliche Wärmedämmung bei Gebäuden notwendig (z. B. Mineralschaum oder Glaswolle)
- Zugfestigkeit sehr klein im Vergleich zu Druckfestigkeit (Lösung ist Stahlbeton)

2.2.2 Stahlbeton und Armierung

Zur Erhöhung der Tragfähigkeit (insbesondere niedrige Zugfestigkeit) werden ins Beton Stahlstäbe eingegossen. Dieser Verbundwerkstoff wird als Stahlbeton bezeichnet. Auch weitere Materialeigenschaften (wie z. B. Schlag-, Biege- und Druckfestigkeit) können mithilfe von der Armierung verbessert werden. Durch Einbau der Armierung ist es möglich anisotropes (laut [15] wird Anisotropie als Richtungsabhängigkeit einer Eigenschaft oder eines Vorgangs festgelegt) Verhalten der Beton zu erzielen. [8]

Armierung

Stahl, die zur Herstellung der Armierung für Stahlbeton verwendet wird, bezeichnet man als Baustahl (auch Bewehrungsstahl bzw. Betonstahl). Heutzutage zur Anwendung kommende Betonstahl weist eine charakteristische Streckgrenze $R_e = 500 \text{ N/mm}^2$ auf. Nächste gewünschte Eigenschaft ist sogenannte Verformungsverfestigung, d. h. Zunahme der mechanischen Festigkeit eines Werkstoffs durch plastische Verformung. Armierung in der Beton führt auch zu erhöhten Wärmeübertragung. Andere Kennzeichen von Betonstahl werden in [16] beschrieben. Betonstahl werden mit dem Buchstabe "B" (z. B. B500A oder B500B) bezeichnet. [16]

Betonstahl wird in vordefinierten Abmessungen und durch spezifische Technologie (meistens Kaltumformung und Warmwalzen) anfertigt. Mögliche Ausführungen zur Lieferung sind z. B. [16]:

- Betonstabstahl $\varnothing d 6 - 40 \text{ mm}$, Länge bis 18 m)
- Betonstahlmatten (verschweißte Matten, $\varnothing d 6 - 14 \text{ mm}$)
- Betonstahl in Ringen ($\varnothing d 6 - 16 \text{ mm}$)
- Bewehrungsdraht (mit flacher Profilierung im $\varnothing d 6 - 16 \text{ mm}$)
- Gitterträger (bei Halbfertigteildecken und -wänden)

Bei der Verwendung der Bewehrung müssen die bautechnischen Vorschriften unbedingt geachtet werden. Besonderheiten, die eingehalten werden müssen, sind folgende [17]:

- den Abstand der einzelnen Bewehrungselemente
- die Anordnung und vor allem die Anzahl der Bewehrungselemente
- besonders zu verstärkende Bereiche
- die Verbindung der einzelnen Bewehrungselemente miteinander

Wenn eine noch stärker zugbelastbare Konstruktion notwendig wäre, spricht man über Spannbeton. Der enthält vorgedehnte Stahlglieder. [8]

Zur Anwendung werden meistens Polymerbeton bzw. HPC/UPHC gebraucht. [12]

2.2.3 Polymerbeton/Mineralguss

Polymerbeton (auch Mineralguss genannt) unterscheidet sich von konventionelle Beton dadurch, dass an der Stelle von Zement als Bindemittel Kunststoff (Polymer) verwendet wird. Gesteinskörnungen werden in sogenannte Kunststoff-Matrix zusammengehalten. Durch den Einsatz von Kunststoff können besondere Eigenschaften erreicht werden. Reaktionsharz ist den Bestandteil der Kunststoffmatrix. Im Reaktionsharz im flüssigen Zustand werden Gesteinskörnungen eingebracht, anschließend erstarrt die Mischung. [8, 18]

Wie herkömmlicher Beton wird auch den Polymerbeton für Anwendungen bis zum höchsten Belastungsfällen eingesetzt. Wesentliche Vorteile von Polymerbeton sind folgende [18]:

- geringere Gewicht (günstig für Herstellung und Transport)
- viel fester als Zementbeton
- porenarme Oberfläche (wasserdicht und chemischbeständig)
- formbeständig auch bei höhere Temperaturen, UV-unempfindlich

Einsatzbereiche entsprechen den besonderen Eigenschaften dieser Werkstoff

- Bau von Fundamenten oder Gestellen für Maschinen und Anlagen
- Entwässerungsrinnen, Rohre, Kabelkanäle oder Lichtschächte
- Garten- und Parkbänke, Spielgeräte, Pflanzkästen

2.2.4 HPC

Verkürzung HPC (aus englisch *High Performance Concrete*) bezeichnet eine Gruppe von Hochleistungsbeton bzw. Hochfesterbeton mit besonderen Eigenschaften, die nicht immer mit Beton zu erreichen sind. Vornehmlich sind die Folgende [19]:

- erhöhte Druckfestigkeit (bis 150 N/mm^2)
- höhere Festigkeit
- längere Dauerhaftigkeit des Betons
- Widerstand gegen chemische und mechanische Beanspruchung

Erhöhte Druckfestigkeit und höhere Festigkeit sind Ergebnisse von verringerter Porosität, die durch Einsatz von spezielles Gesteinkörnungen, Minimierung des Wasserzementwertes und leistungsfähige Fließmittel, beeinflusst wird. Das führt zur Optimierung des Betongefüges und dadurch verbesserte Eigenschaften. [19] Es gibt nicht nur Vorteile, aber auch Nachteile, beide werden in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Einsatzmöglichkeiten von HPC werden in der Normwerk [13] festgelegt.

- druckbeanspruchte Bauteile (hoch beanspruchte Stützen, Wände usw.)
- biegebeanspruchte evtl. vorgespannte Bauteile (Balken, Brückenträger usw.)
- chemisch hoch beanspruchte Bauteile (Abwasserrohre für aggressive Medien usw.)

Tabelle 2.2 Vorteile und Nachteile von HPC [19]

Vorteile	Nachteile
Höhere Druckfestigkeit und Zähigkeit	Gestaltung präziser Abguss nicht möglich
Einfachere Herstellung	Spröder Material
Billiger als Polymerbeton	Teurerer als Zementbeton
Niedrige Wärmeleitfähigkeit	
Höhere Dämpfung	

2.2.5 Grauguss und Stahlguss

Günstig für Serienfertigung sind Gestelle, die durch Gießverfahren hergestellt werden. Bei kleineren Stückzahlen ist die Herstellung relativ teuer, weil die Modellkosten für die Sandgussform relativ ungünstig im Vergleich zur Stahlgestell sind. [3]

Grauguss weist sehr gute Dämpfungseigenschaften, aber hat nur cca 70% – 80% E-Modul des Stahls (d.h. 150 – 170 GPa). Deshalb müssen die Wände entsprechend stärker sein, um die notwendige Steifigkeit zu erreichen. Stahlguss dagegen dazu hat ein höheres E-Modul (200 – 210 GPa), dessen Wert mit Stahl vergleichbar ist. Das führt zur Verwendung von GS bei besonders hoch belasteten Gestellen wie beispielsweise bei Pressen. [3]

Die Oberflächenqualität nach dem Abguss erreicht nicht die notwendige Rauheit, um als die Anlagefläche für Komponenten, die angeschraubt werden, dienen zu können, müssen diese Flächen noch bearbeitet werden.

Aber die Zerspanbarkeit des Grauguss ist wegen des hohen Grafitanteils sehr gut. Nächstes Nachteil der Grauguss ist seine geringe Verschleißfestigkeit. [3]

2.2.6 Vergleich Materialien

In folgende Tabelle 2.3 werden wichtige Eigenschaft von schon genannten Werkstoffen, die zur Maschinengestellherstellung dienen, vergleichen.

Tabelle 2.3 Vergleich verschiedener Gestellmaterialien [2]

	St	GJS	GJL	MG
E-Modul [$10^5 N/mm^2$]	2,1	1,65 – 1,85	0,8 – 1,4	0,4
spezifisches Gewicht γ [N/dm^3]	78,5	74,0	72,0	23,0
Wärmeausdehn.-koef. α_k [$10^{-6} K^{-1}$]	11,1	9,5	9,0	10 – 20
spez. Wärmekapazität c [$J/(kg \cdot K)$]	0,45	0,63	0,46	0,9 – 0,11
Wärmeleitfähigkeit λ [$W/(m \cdot K)$]	14 – 52	29	54	1,5
Streckgrenze R_e [$10^2 N/mm^2$]	4 – 13	4 – 7	1 – 3	0,1 – 0,18
Werkstoffdämpfung $k \cdot 10^{-3}$	2,3	–	4,5	20

St bedeutet Stahl, GJS Gusseisen mit Kugelgraphit, GJL Gusseisen mit Lamellengraphit und MG Mineralguss/Polymerbeton.

2.3 Thermomechanische Grundlagen

In diese Unterkapitel werden die grundlegende Information zur Thermomechanik, Wärme und Wärmeübertragung dargestellt. Um die Problematik von thermischen Belastung von WZM richtig verstehen zu können und Kenntnisse zur Problemlösung in diesem Bereich gewinnen, ist es notwendig die elementare Theorie von Thermomechanik zu beherrschen.

Thermomechanik beschäftigt sich mit Erhaltung, Umwandlung und Transport von Energie. Man teilt Thermomechanik auf zwei große Abteilungen/Teile unter [20].

- Thermodynamik
- Wärmeübertragung

2.3.1 Grundlagen der Thermodynamik

Thermodynamik befasst sich mit Größen, die zur Charakterisierung des makroskopischen Zustand des Systems benutzt werden, und mit deren Veränderung bei physikalischen Vorgängen, bei denen Wärmeaustausch mit Umgebung erfolgt. Als eine Voraussetzung gilt, dass das System im thermische Gleichgewicht mit Umgebung ist. Meistens werden in der Thermodynamik Aufgaben nur mit Endzuständen zählen/berechnen, d. h. nur die Zustandsänderung (Änderung der Zustandsgrößen) nicht die Zwischenstufen werden berücksichtigt. [20, 21]

Thermodynamisches System

System wird als Bereich mit festdefinierten Grenzen betrachtet. Grenze trennt das System von der Umgebung oder anderen System. Grenzen können ortsfest oder ortsveränderlich sein. Zustandsgrößen, die das System beschreiben, sind messbar. Man stellt 4 Arten von thermodynamischem System fest [20]. Die Abbildung 2.5 zeigt einzelne Systeme.

- Offenes System
 - durchlässig für Energie
 - z. B. Turbine, Pneumatikzylinder
- Geschlossenes System
 - durchlässig für Energie
 - undurchlässig für Materie, keine Stoffströme
 - Masse bleibt bei Zustandsänderung konstant
 - z. B. Warmwasserheizung, Hydraulikspeicher
- Abgeschlossenes System
 - undurchlässig für Energie und Materie
 - z. B. Thermoskanne

- Adiabates System
 - isoliert von jeglichen Wärmetausch mit der Umgebung
 - undurchlässig für Energie und Materie
 - durchlässig für mechanische Arbeit
 - z. B. Luftpumpe

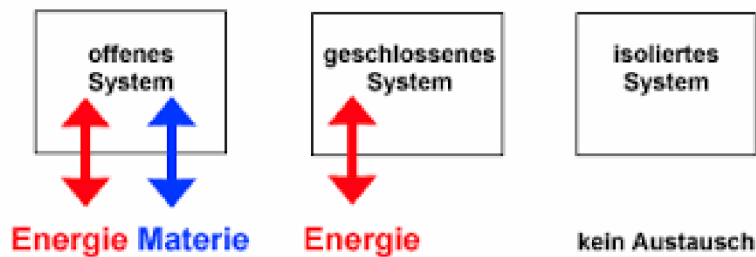


Abbildung 2.5 Arten von thermodynamisches System [22]

Hauptsätze der Thermodynamik

Alle in der Thermodynamik durchlaufende Zustandsänderungen und Prozessen folgen sogenannte thermodynamische Hauptsätze, die immer gelten. [20, 21]

- Nullter Hauptsatz
 - Wenn ein System A sich mit einem System B sowie B sich mit einem System C im thermischen Gleichgewicht befindet, so befindet sich auch A mit C im thermischen Gleichgewicht
 - dient zur Temperaturmessung

$$T_A = T_B = T_C \quad (2.1)$$

- Erster Hauptsatz
 - Energie eines abgeschlossens Systems ist konstant
 - beschreibt die Energieerhaltung in thermodynamischen System

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (2.2)$$

- Zweiter Hauptsatz
 - In abgeschlossenen Systemen kann aus Wärme nicht ohne Einschränkung beliebig mechanische Arbeit erzeugt werden
 - einführt den Prinzip von Irreversibilität

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (2.3)$$

- Dritter Hauptsatz
 - die Veränderung von Entropie von Stoffen mit sinkende Temperatur wird verkleinert
 - der absolute Nullpunkt der Temperatur kann nicht erreicht werden

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0 \quad (2.4)$$

Wärme

Wärme Q [J] ist eine Prozessgröße, d. h. beschreibt den Prozess der Zustandsänderung (wie ein Zustand in anderen übergeht). Deshalb sind Prozessgrößen von dem Weg der Änderung abhängig. Wärme ist eine Form der Energieübertragung zwischen System und Umgebung. Für abgegebene Wärme gilt die sogenannte kalorimetrische Gleichung

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot (T_{end} - T_{anf}) \quad (2.5)$$

m ist Gewicht [kg], c spezifische Wärmekapazität [$J/(kg \cdot K)$], T_{anf} , T_{end} Anfangs- und Endtemperatur [K]. [21]

2.3.2 Wärmeübertragung (Thermokinematik)

Ein Teil von Thermomechanik, der Antwort auf die Frage, wie wird spezifische Wärme in einem System auf bestimmte Fläche zu- oder abgeführt. Grundannahme für Wärmeübertragung zwischen System und Umgebung ist die Existenz eines Temperaturgradient oder Temperaturunterschied. [20, 21]

Man unterscheidet drei prinzipielle Mechanismen [20, 21]:

- Wärmeleitung (Konduktion)
- Wärmeströmung (Konvektion)
- Wärmestrahlung (Radiation)

Wichtigsten Größen, die Wärmeübertragung definieren, sind [20, 23]:

- Wärmestrom [$J/s; W$]

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad (2.6)$$

- Wärmestromdichte [W/m^2]

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2.7)$$

Wärmestromdichte ist Wärmestrom bezieht auf die Fläche A .

Konduktion

Konduktion ist Energieübertragung zwischen zwei Partikeln, bzw. Stoffen mit unterschiedlichen Energieniveau/Temperaturen. Immer erfolgt in der Richtung geringer Temperatur (gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik). Konduktion kann zwischen Feststoff, Fluid oder Gas ablaufen. [20, 21]

Für Konduktion gilt Fouriersches Gesetz. Die Wärmemenge Q , die in einer bestimmten Zeit t durch eine Wand mit der Dicke x und der Fläche A mit einem Temperaturgefälle mittels der folgenden Formel beschrieben werden kann [23]:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.8)$$

bzw. allgemein in 3D [23]:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \vec{\nabla} T \quad (2.9)$$

wo Temperaturgradient in Kartesisches Koordinatensystem wird definiert als

$$\vec{\nabla} T = \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \cdot \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \cdot \vec{k} \quad (2.10)$$

mit λ [$W/(m \cdot K)$] Wärmeleitfähigkeit (auch Wärmeleitkoeffizienz) ist eine physikalische Eigenschaft des Stoffes, die bei fast alle Stoffen Funktion der Temperatur ist (bei inhomogene Stoffen hängt auch von der Position in Körper ab). In vereinfachten Fällen in Rahmen kleinen Temperaturänderungen wird λ als Konstante betrachtet.[20, 23] Verschieden Stoffe verfügen über unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit, ein kleines Übersicht bietet folgende Tabelle 2.4 an.

Tabelle 2.4 Wärmeleitfähigkeit verschiedenen Stoffen [21]

	Gase	Fluide	Feststoffe	reine Kristalle
λ [$W/(m \cdot K)$]	0 bis 0,1	0 bis 1	0 bis 400	bis 10000

Konvektion

Eine der 3 Arten von Wärmeübertragung, der mit dem Transport von Teilchen verbunden ist. Immer erfolgt in der Richtung geringer Temperatur (gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik). Meistens tritt auf Grenzen zwischen Oberfläche eines Körpers und umliegende Flüssigkeit auf. Man teilt die Konvektion laut [21] ein:

- erzwungene Konvektion
 - wird durch äußere Wirkung verursacht (z. B. Ventilator oder Pumpe)
- freie bzw. natürliche Konvektion
 - wird nur durch den Auswirkung des Temperaturgradient hervorruft (z. B. Handtuch an dem Trockner)

Wärmeübetragung zwischen Fluid und Wand wird in den sogenannten Newtonsches Abkühlungsgesetz beschreibt. [23]

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_W - T_{Fl}) \quad (2.11)$$

Der Parameter α [$W/(m^2 \cdot K)$] ist ein Wärmeübergangskoeffizient. Es ist ein Faktor, der zur Beschreibung die Intensität des Wärmeübergangs an einer Grenzfläche dient. Für einzelne Kombinationen von Materialien gibt es ein spezifisches Wert. T_W [K] Wandtemperatur. T_{Fl} [K] Fluidtemperatur. [23]

Wie schon erwähnt, α ist keine Konstante, sondern ein spezifisches Wert für jegliche Kombination von Materialien. Bei heutigen technischen Berechnungen wird der mittlere Wärmeübergangskoeffizient, der für eine gegebene Geometrie und Temperaturunterschied zwischen Wandtemperatur und Fluidtemperatur spezifisch ist, verwendet. Dieser Koeffizient ist proportional zu dimensionslosen Nußelt-Zahl Nu . Nußelt-Zahl ist bei gegebene Geometrie eine reine Funktion der Prandtl-Zahl Pr und Reynolds-Zahl Re . Um mehr Information über diese Zahlen und über Konvektion zu gewinnen, empfehle ich folgende Literatur [20, 23]. Gründliche Beschreibung diesem Vorgang überschreitet der Rahm dieser Arbeit.

Wärmestrahlung

Dritter Art von Wärmeübetragung. Es geht um ein Prozess, der zwischen zwei Flächen mit Temperatur höher als $0 K$ durchläuft. Alle diese Flächen strahlen (emittieren) die Energie in der Richtung von Zweiten aus. Entstehende Wärmestrahlung ist stark abhängig von der Oberflächenqualität, -beschaffenheit und Eigenschaften von Materialien. Mit steigende Temperatur erhöht sich auch die ausgestrahlte Energie (Stefan-Boltzmann-Gesetz). Wärmestrahlung, im Gegensatz zu Konvektion und Konduktion, vermittelt die Wärmeübertragung auch in den stofflosen System, typischerweise im Vakuum. [21, 23]

Strahlungsleistung P_s [W] eines idealen Schwarzen Körpers (absorbiert alle ankommende elektromagnetische Strahlungen) der Fläche A [m^2] in Abhängigkeit von seiner Temperatur T [K] wird anhand von Stefan-Boltzmann-Gesetzt beschrieben.[21]

$$P_s = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2.12)$$

σ ist sogenannte Stefan-Boltzmann-Konstante. $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$

Wärmeleitungsgleichung

Bei fast alle technischen Lösungen erschienen verschiedene Kombination Wärmebelastung, die nicht stationär sind und ändern sich in der Richtung, Größe usw. Deshalb existiert eine Gleichung, die alle diese Unregelmäßigkeiten beinhaltet. [20, 24]

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = \frac{\partial T}{\partial \tau} \rho c \quad (2.13)$$

Gleichung (2.13) wird Wärmeleitungsgleichung für instationare Wärmeleitung für das Volumenelement genannt (auch Fouriersche Differentialgleichung).

T Temperatur [K], λ Wärmeleitfähigkeit [$W/(m \cdot K)$], Q volumetrische Wärmestromdichte [W/m^3], ρ Dichte [kg/m^3], c spezifische Wärmekapazität [$J/(kg \cdot K)$], τ Zeit [s]. [21]

In diesem Zustand ist die Gleichung 2.13 nicht lösbar. Zur Lösung werden die Randbedingungen notwendig [21].

- Oberflächentemperatur bekannt $T_w = konst.$ $\rightarrow T_w = f(x_w, y_w, z_w, \tau)$
- Wärmestromdichte ist konstant $\dot{q}_w = konst.$ $\rightarrow \dot{q}_w = f(x_w, y_w, z_w, \tau)$
- Wärmeübergangskoeffizient bekannt $\alpha = konst.$ $\rightarrow \alpha = f(x_w, y_w, z_w, \tau)$

Index w bedeutet *Wandtemperatur*, d. h. Oberflächentemperatur, t ist Zeit [s]. Im Fall der stationären Strömung wird Gleichung 2.13 in folgende umgesetzt [20].

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = 0 \quad (2.14)$$

Gleichungen 2.13 und 2.14 dienen als theoretische Grundlagen zur Berechnung des Temperaturfeld und thermische Spannung in FEM. [25]

2.4 Thermisches Verhalten von WZM

Thermisches Verhalten von WZM (Maschinen zur Fertigung von Werkstücken mit Werkzeug) ist eine technische Eigenschaft von WZM (andere sind z. B. statische oder dynamische Steifigkeit), das große Einfluss auf der Qualität von Werkstücken und Produktivität der WZM nehmen. Es beschreibt die Reaktion der Maschine auf äußere und innere Wärmequelle. Als qualitätsbestimmende Merkmal wird meistens die Auswirkung der Wärmequellen auf die relative Lage zwischen Werkstück und Werkzeug. Bei der Beschreibung des Temperatureinflusses steht zur Verfügung auch die Möglichkeit, die Messung auf alle sechs Freiheitsgrade zu beziehen. [2]

2.4.1 Wärmequelle bei der WZM

Man unterscheidet zwei Arten von Wärmequellen, die Genauigkeit reduzieren. [2]

Äußere Wärmequelle

Äußere Wärmequelle sind diejenige, die unabhängig auf die WZM entstehen und wirken. [2]

- Umgebung (verschiedene Temperaturniveau in der Werkhalle sogenannte Temperaturschichtungen)
- Wärmestrahlung von Heizungen, durch Fenster und von anderen Maschinen
- Temperatur- und Wärmestrahlungsänderungen über der Fertigungszeit

Wirkung von äußeren Wärmequellen soll vom Maschinenbetreiber als niedrig als möglich gehalten sein. Am besten Fall vermeiden.

Innere Wärmequelle

Innere Wärmequelle sind diejenige, die während der Betrieb von Werkzeugmaschinen Wärme produzieren. Dadurch erhöht sich die Temperatur. [2] Die Abb. 2.6 zeigt, wie die Temperatur von einer Kugelgewindespindel im Verfahrbereich der Kugelgewindemutter nach 6-stündigem Reversierbetrieb mit 24 m/min zwischen zwei 150 mm voneinander entfernten Punkten verändert wird.

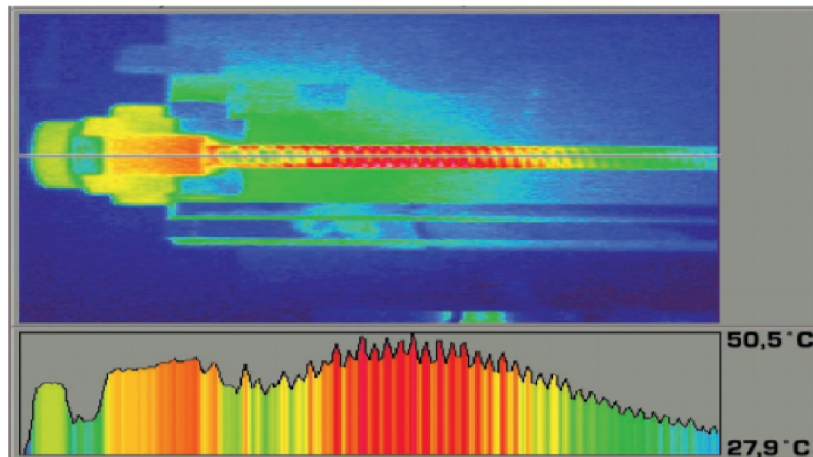


Abbildung 2.6 Erwärmung einer Kugelgewindespindel [26]

Diese Erhöhung beeinflusst am meisten die relative Lage zwischen Werkzeug und Werkstück und dadurch die Genauigkeit. Zu kritischen Stellen (auch Wärmequelle genannt) gehören z. B. [2]:

- Erwärmung elektrischer und elektronischer Bauelemente
- Reibungswärme an Führungen, Lagern, Zahnrädern, Riemen, Kupplungen und anderen mechanischen Elementen
- Erwärmung hydraulischer Bauelemente und des Öls
- Wärmeabgabe vom Prozess (heiße Späne, Temperaturänderung des Kühlschmierstoffes)

Innere Wärmequelle sollen bei dem Entwurf von die WZM durch den Konstrukteur zu vermeiden, klein zu halten oder außerhalb der Maschine anzuordnen. Falls diese Maßnahmen nicht durchführbar sind, werden die thermisch-symmetrische Konstruktion oder temperaturkonstante Auslegung (d. h. entweder durch Kühlung oder geregelte Heizung, sogenannte Temperierung), die der Wirkung der Wärmeströme minimieren, eingesetzt. [2]

Im Abb. 2.7 ist eine Messung des thermisches Verhaltens (nach DIN V 8602-1) mit entsprechenden Ergebnissen (Neigungen um die x- und y-Achse) dargestellt. a - Temperaturmessstelle, b - Messdorn, c - Messtaster

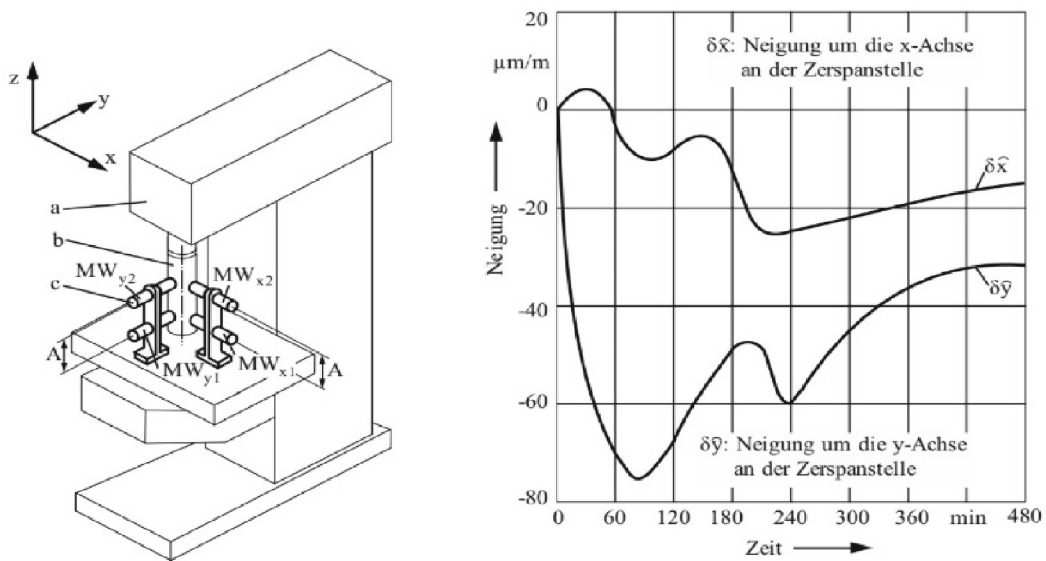


Abbildung 2.7 Beispiel einer Messung des thermischen Verhaltens [2]

2.4.2 Maßnahmen zur Beeinflussung des thermischen Verhaltens

Der Einfluss von Wärmequellen kann mit geeignete Maßnahmen vermindert werden. Alle Maßnahmen haben spezifische Anwendung und dienen zur Unterdrückung spezifischer Wärmequelle. Die Maßnahmen unterscheiden sich deutlich im physikalischen Prinzip des Eingriffs (mechanisch, thermisch, thermodynamisch, steuerungs- und regelungstechnisch). Deshalb bietet die Tabelle 2.5 einer Übersicht über möglichen Maßnahmen und ihrer Einteilung nach dem Eingriffszeitpunkt in der thermo-elastischen Wirkungskette. Es wurden zwei Arten von Maßnahmen definiert [27]:

- passive Maßnahmen
 - vorwiegend in der Entwurfsphase des Produkts
 - ohne direkten Einsatz von Fremdenergie
 - alle konstruktive und gestalterische Ansätze
 - z. B. Isolation, Werkstoffauswahl usw.
- aktive Maßnahmen
 - mit Einsatz von Fremdenergie
 - Anwendung Messsensorik zur einfache Anpassung an den konkreten Einsatzfall

Temperierung

Der Begriff Temperierung steht für die Regelung der Temperatur (meistens geregelte Heizung), aber auch für eine Art der Gebäudeheizung oder -kühlung. In der

Tabelle 2.5 Maßnahmen zur Beeinflussung des thermisches Verhaltens [27]

Beeinflussung von	Passive Maßnahmen	Aktive Maßnahmen
Wärme-strömen	Reduzierung der entstehenden Wärme (Technologie) Reduzierung der entstehenden Wärme (Energieeffizienz) Isolation/Auslagern der Wärmequellen	Umgebung der Maschine Wärmequellen in der Maschine
Temperatur-feld	Wärmeleitung Wärmeübergang Wärmespeicherung	Innere Kühlung durch Fluide Äußere Kühlung Temperierung Heizen
Verformungs-feld	Gestaltung Wärmeausdehnung (Werkstoff)	Korrekturmaßnahmen (Steuerung) Verformungskompensation

Maschinenbauindustrie wird es (mit Kühlung) als eine konventionelle Maßnahme zur Kompensierung der Wärmequellen in der WZM (Maschinensktruktturen bzw. auch ganzer Fertigungsbereiche) eingesetzt. Ziel der Temperierung ist, die Thermostabilität zu erreichen, d. h. die WZM auf eine Konstante Betriebstemperatur zu halten. Durch die Kompensierung wird die Genauigkeit der WZM positiv beeinflusst. Dann werden die Thermo-elastischen Verformungen infolge des thermisches Belastung in kleineren Bereichen auftreten. [28]

2.5 Numerische Lösungsansätze

Die numerische Mathematik, auch kurz Numerik genannt, beschäftigt sich als Teilgebiet der Mathematik mit der Konstruktion und Analyse von Algorithmen für kontinuierliche mathematische Probleme. Hauptanwendung ist dabei die näherungsweise (oder approximative) Berechnung von Lösungen mit Hilfe von Computern [29]. Beispiele sind laut [27] Finite-Elemente-Methode (FEM), Finite-Differenzen-Methode (FDM) oder Randelementmethode (REM).

2.5.1 FEM Grundlagen

FEM ist ein numerisches Näherungsverfahren, das zur Berechnung in Bereichen dient. Mithilfe von FEM können folgende Feldprobleme gelöst werden [27]:

- Strukturmechanik
- Temperaturfeldern
- Magnetfeldern
- Strömungsfeldern

Heutzutage finden FEM-Programmen dank ihre einfache Bedienung und umfangreiche Einsatzmöglichkeiten vielfältige Anwendungen.

Das ganze zu untersuchende Gebiet oder Struktur wird in endlich kleine (Finite) Bereiche (Elemente mit Knoten am Rand) mit ähnlicher Größe unterteilt. Dieser Vorgang wird als Gebietdiskretisierung bezeichnet. Wichtiges Faktor, der die Genauigkeit wesentlich beeinflusst, ist die Netzfeinheit. Je kleiner die Elemente werden (d. h. die Abstände zwischen Knoten und Elementen sind kleiner und die Gitter ist feiner), desto genauer die Ergebnisse werden. Deshalb wird für die kritischen Stellen feinere Netz verwendet. Für alle andere Bereiche kann gröbere Netz eingesetzt werden (das spart notwendige Zeit für die Lösung). Steigende Netzfeinheit weist einen Nachteil, es führt zur Zunahme des Berechnungsaufwands, auf. [30]

Für problemlose kontinuierliche Anschluss und Übergänge einzelnen Elementen sorgt die sogenannte Ansatzfunktion.

2.5.2 FEM Grundgleichung

Einfaches Beispiel einer FEM Aufgabe ist ein gerader Stab, wo die Geometrie, Werkstoffeigenschaften, Belastung und Lagerungen bekannt sind und Spannungen und Verzerrungen bestimmt werden müssen.

Für Strukturmechanik lautet dann die Grundgleichung in Matrixform

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (2.15)$$

wo \mathbf{k} Steifigkeitsmatrix, \mathbf{u} auftretende unbekannte Verschiebungen und \mathbf{F} Matrix der bekannten Kräfte,.

Für allgemeinen Fall gilt folgende Form

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (2.16)$$

mit \mathbf{A} eine rechteckige Anordnung von Größen, die meistens physikalisch deutbaren Größen werden (z. B. Temperatur), die Matrix genannt werden soll, \mathbf{x} Vektor der Unbekannten und \mathbf{y} Vektor der bekannten Rechten Seiten.

Das in der Gleichung 2.16 vorgestellte lineare Gleichungssystem kann auch wie folgt ausgeschrieben werden [31]:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{d1} & a_{d2} & a_{d3} & \dots & a_{dn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

2.5.3 FEM für thermisches Problem

Nächste sehr verbreite Probleme, die mithilfe von FEM gelöst werden können, sind die thermische Aufgabe. Die werden häufig mit der Spannungs-Dehnungs-Analyse gefolgt (Sequentielle/ aufeinander folgende Analyse oder sogenannte

Thermo-mechanische Analyse). Erst wird das Temperaturfeld definiert und dann die Temperaturbelastung, die durch Wärmeausdehnung verursacht wird. [24]

Das ganze wird in folgende Gleichung, die von allgemeinen Fall in 2.16 ausgeht, umgesetzt [24]:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{T} = -\mathbf{Q} \quad (2.17)$$

Gleichungssystem 2.17 beschreibt die diskretisierte stationäre Wärmeübertragung, wo \mathbf{K} Gesamtleitfähigkeitmatrix, \mathbf{T} Temperaturvektor und \mathbf{Q} Lastvektor in Form von Wärmeströmen (Wärmestromvektor) sind. [24] Negative Vorzeichen vor \mathbf{Q} steht in der Übereinstimmung mit Vorzeichenkonvention. Abgeführte Wärme wird mit Minus gekennzeichnet, d. h. in der Gleichung 2.17 würde dann positive Wert auf die rechte Seite aufgetreten.

Im Fall einer transiente Aufgabenstellungen, wird Gleichung 2.17 um eine Kapazitätsmatrix \mathbf{C} und Temperaturgradientenmatrix $\dot{\mathbf{T}}$ erweitert. Das führt zum Gleichungssystem 2.18. [24]

$$\mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{T}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{T} = -\mathbf{Q} \quad (2.18)$$

2.6 Präzisierung der Aufgabenstellung

Nachdem die zum Verstehen dieser Arbeit notwendigen Informationen erarbeitet und die Inhalte von bestehenden Arbeiten abgrenzt wurden, folgte der praktische Teil dieser Arbeit.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Untersuchungen zu der Bestimmung des Wärmeübergangsverhaltens zwischen Beton und Armierung sowie der Einfluss der Armierung auf das Wärmeverhalten durchgeführt. Dazu werden vier Probekörpern aus jeweils zwei Betonarten (Hydropol „Medium“ und Hydropol „Schwer“) für die Messung zur Verfügung gestellt. Die Sensorpositionen müssen so gewählt werden, dass den Einfluss und das Wärmeübergangsverhalten richtig erfasst werden. Messdaten werden softwareunterstützt (Software Catman Easy) aufgenommen. Bei jeder Messung werden gleichzeitig zwei Proben der gleichen Sorte erforscht. Nach der Erwärmung, die ungefähr 8 Stunden dauert, erfolgt eine Abkühlung, die ca. 2 – 3 Tage durchlaufen wird. Erst danach dürfen nächste Probe gemessen werden.

Die ermittelten Ergebnisse sind auszuwerten. Zur Bewertung und Validierung der Ergebnisse werden Simulationen in „Ansys CADFEM Mechanical“ vorbereitet.

Danach werden alle Werte verglichen und daraus folgende Schlüsse, die in anschließenden Projekten verwendet werden, gezogen.

Die Zusammenfassung beschreibt neben der Erfüllung der Bachelorarbeitsanforderungen, d. h. ob die gemessenen Daten und die Simulation übereinstimmen, ebenso den Ausblick über mögliche zukünftige Entwicklungen.

Strany 24–74 nejsou na základě směrnice TU Chemnitz číslo 21/2008 „Prüfungsordnung für den konsekutiven deutsch-tschechischen Studiengang Produktionssysteme mit dem Doppelabschluss (double degree) Master of Science (M.Sc.) und Inženýr (Ing.) an der Technischen Universität Chemnitz vom 11. Juli 2008“ o závěrečných pracích zpracovávaných v režimu utajení veřejné.

Kapitel 9

Shrnutí práce v českém jazyce

Tato kapitola se zabývá obsahem bakalářské práce v českém jazyce. Jsou zde uvedeny nejdůležitější informace k pochopení tématu a dosažených výsledků. Jedná se především o překlad a shrnutí hlavních částí respektive kapitol s odkazy na text v originálním jazyce.

9.1 Úvod a stanovení cílů

První kapitola krátce popisuje důvody, proč se na tepelné chování výrobních strojů klade v poslední době stále větší důraz. Dále krátce shrnuje cíl této práce a představuje projekt, pod který tato práce spadá.

Jedná se Sonderforschungsbereich Transregio 96 (krátce SFB/TR96). Neboli společnou výzkumnou činnost 3 univerzit (TU Chemnitz, TU Dresden a RWTH Aachen University) v oblasti termo-energetického konstrukce výrobních strojů.

Výsledky této práce spadají do projektu T02: *Robuste und thermo-energetisch optimierte Temperierung von Werkzeugmaschinenstellen mittels fluidtechnischer Systeme (Kurztitel: Effiziente Gestelltemperierung)*, jehož cílem je optimalizování tepelných toků v rámech výrobních strojů konstruovaných z minerálního betonu.

9.2 Stav poznání

Kapitola Stand der Technik shrnuje současné poznatky a důležité informace o rámech výrobních strojů a materiálů používaných na jejich konstrukci. Důraz je kladen především na beton (s přídatným armování - tzn. železobeton) a polymerbeton (v německém jazyce označován jako Mineralguss). Polymerbeton je kompozitní materiál, jehož základním prvkem je organická matrice a anorganické plnivo, které může tvořit až 80% celkového objemu.

Při měření a simulaci byla využita speciální betonu Hydropol od firmy Framag, a to ve dvou provedeních lišících se vlastnostmi - Hydropol „Medium“ a Hydropol „Schwer“. Hydropol se vyznačuje výborným tlumením vibrací a vhodnými tepelnými vlastnostmi. Zejména nízkou tepelnou vodivostí a vysokou měrnou tepelnou kapacitou. Porovnání s šedou litinou a ocelí lze najít v tabulce 5.2.

Kapitola pokračuje termomechanickými základy. Popsány jsou nejenom základy termodynamiky jako druhy systémů, základní termodynamické věty (tzv. zákony), ale

převážně přenos tepla. Ten hraje u tepelného chování výrobních strojů důležitou roli. V současné době se jedná o hlavní zdroj nepřesností u výrobních strojů. Stručně byly popsány všechny druhy přenosu tepla. Radiace (neboli záření) a konvekce (proudění) pouze stručně, u provedeného měření a simulace mají zanedbatelnou roli. Klíčový je přenos tepla kondukcí (vedením). Byl popsán fourierův zákon (rovnice 2.8 a 2.9) a vysvětlena důležitost tepelné vodivosti látek λ .

Protože v reálných situacích probíhá zřídka pouze jeden druh přenosu tepla, byla představena fourierova diferenciální rovnice vedení tepla pro stacionární a nestacionární vedení tepla (rovnice 2.13 a 2.14), která zahrnuje více druhů tepelného zatížení.

Následoval krátký popis tepelného chování výrobních strojů, přičemž bylo zmíněno dělení zdrojů tepla na vnitřní a vnější. Ke každému byly uvedeny příklady. Současně byly shrnuta možná opatření k ovlivnění tepelného chování. Ta se dělí na pasivní a aktivní. Tabulka 2.5 uvádí členění podle ovlivňované veličiny s příklady.

Poslední část se zabývá popisem metody konečných prvků (MKP), jejím základním popisem a vztahením na tepelnou analýzu.

9.3 Vzorčky

Po shrnutí teoretických základů byly v kapitole 3 popsány vzorky, na kterých proběhlo měření. Celkově se jednalo o 4 tělesa ze dvou druhů Hydropol („Medium“ a „Schwer“) s rozdílnými vlastnostmi. U každého ze dvou zmíněných druhů byly vzorky dále rozděleny na jeden z betonu a druhý s přidáním ocelovými tyčemi a jejich podstavou, které plní úlohu armování a jeho vliv. Zhotovení dílů s armováním a umístění ocelových tyčí je vidět na obrázcích 3.2 a 3.3. Vzorek s armováním byl dodán delší o 20 mm než betonový. Před měřením musel být zkrácen na stejnou délku. Tento délkový rozdíl by mohl zkreslit výsledky měření a simulace. Rozměry vzorků jsou následující:

- Výška 200 mm,
 - Pouze beton 200 mm
 - Beton + armování 200 mm (= 180 mm + 20 mm)
- Průměr $\varnothing 190$ mm
- Ocelové tyče $4 \times \varnothing 16 \times 150$ mm
- Rozteč tyčí $\varnothing 130$ mm
- Úhel mezi nimi $\angle = 90^\circ$

Měřena byla teplota na povrchu, jak značí obrázky 3.4 a 3.5, na kterých jsou znázorněny pozice, na které byly umístěny senzory včetně jejich pojmenování. U vzorků s armováním bylo senzorů více. Zkoumán byl vliv kontaktu mezi betonem a železem na prostup tepla. Proto byly dvě horní řady (koncovky 1 a 2) umístěny blízko u přechodu mezi materiály. Kromě senzorů umístěných na vnějším plášti byly při výrobě umístěny i senzory dovnitř vzorků. U betonového vzorku je to 1 senzor (označený $T_{B,innen}$), u dílu s armováním jsou senzory 2 (T_1 a T_2). Senzor T_2 byl umístěn u jedné z armovacích tyčí.

9.4 Simulace

Předtím, než proběhlo měření byly nachystány simulace, které slouží k ověření naměřených hodnot a jejich posouzení. Simulace byla vytvořena v programu Ansys Workbench. Krátce byly popsány jednotlivé součásti výpočtu (tzn preprocessor, solver a postprocessor). Následoval popis tvorby simulace včetně geometrie, sítě a také vytvoření kontaktů. Jako typ simulace byla zvolena transienční teplotní analýza, ta byla pro tuto úloha zvolena ze dvou důvodů. Prvním z nich je možnost sledovat postupný prostup tepla ve všech vzorcích a možnost zobrazení výsledku v určitém čase, toto je vhodné ke kontrole s naměřenými daty. Druhý důvod byly zahřívací podložky, které slouží jako zdroj tepla. Před měřením jim byla nastavena stejná hodnota příkonu (a tudíž teoreticky stejný elektrický výkon), ale kvůli různým vlivům se obě použité nezahřívaly stejně (viz. porovnání grafů z měření 6.1 a 6.2). Z tohoto důvodu by nešla provést stacionární analýza přes výkony HM, ty jsou totiž neznámé.

Teplota na HM byla tedy zvolena jako jedna okrajová podmínka. Dále musel být zajištěn odvod tepla. Kvůli tomu byla přidána konvekce na vnější strany izolace, hodnota byla zvolena $\alpha = 1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Mohla by být zvolena i vyšší hodnota, například 10, ani tak by nedošlo k významnému ovlivnění výsledku. Tepelný tok na vnější straně izolace totiž dosahuje nízkých hodnot.

Do vazeb byly také přidány kontaktní odpory mezi několika tělesy. Ty popisují rozdíly teplot v důsledku nedokonalého styku těles. Z určených hodnot tohoto odporu byla zjištěna vodivost kontaktu a ta byla definována v Ansys Workbench. Jednalo se o tyto tělesa:

- Vzorek s armováním
 - Zahřívací podložkou a armováním
 - Zahřívací podložkou a jejím držákem
 - Betonem a armováním
- Betonprobe
 - Zahřívací podložkou a betonem
 - Zahřívací podložkou a jejím držákem

Dále následovalo definování tepelného zatížení (tzn. okrajové podmínky byly přiřazeny) a vložení systémů souřadnic, na které byly následně přiřazeny *Temperaturstichprobe*. Ty slouží k zobrazení požadované veličiny (zde teploty) v jednotlivých časových úsecích. Přiřazeny byly na místa, kde budou při měření umístěny senzory. Dalším krokem bylo provedení měření, bez hodnot z něj nebylo možné simulaci dodělat.

9.5 Experimentální zkoumání vzorků

Kapitola byla rozdělena na dvě části. V první je popsána *Klimazelle*, ve které bylo měření provedeno a materiály pomocí kterých, respektive které byly předmětem měření. Druhá část se zabývala popisem měřicího pracoviště a také samotným průběhem měření. Na obrázku 5.2 je vidět měřicí stanoviště. Na pravé straně je počítač se software *Catman*

sloužící k zaznamenávání naměřených hodnot. Uprostřed jsou vidět oba připravené vzorky a na levé straně (na židli) ležící zesilovače, do kterých jsou zapojeny senzory. Poté následuje popis přípravy měření. Začíná přípravou vzorků na umístění senzorů a jejich následné uchycení. Na obrázku 5.3 jsou vidět nalepené senzory na jednom z vzorků. V dalším kroku byly senzory přiřazeny a přejmenovány na pc, aby odpovídaly zvolenému pojmenování (tabulka 5.4). Posledním krokem bylo nastavení zahřívacích podložek, tzn. určení správného výkonu, aby nedošlo k prudkému nárůstu teploty, případně k tavení kabelu vedoucího k senzorům umístěným uvnitř tělesa.

Další podkapitola se věnuje samotnému průběhu měření. Vzorky byly nejprve vloženy do válce na dolní vrstvu izolace, omotány z boku další vrstvou a nakonec přikryty shora nejprve nehořlavou (bílou) izolací (obrázek 5.4 a nakonec válcovým dílem, který slouží jako poklop (obr 5.5). Poté bylo odstartováno měření, které trvalo přibližně 8 hodin - tzn. jeden pracovní den, měření jedné sady vzorků bylo zakončeno samovolným ochlazením.

9.6 Vyhodnocení získaných dat

Tato kapitola popisuje a shrnuje naměřené a nasimulované výsledky. Jak u experimentu, tak i u simulace byl popsán každý vzorek samostatně s důrazem na možné odchylky oproti očekávaným výsledkům.

9.6.1 Výsledky experimentu

Postupně byly popsány všechny grafy, které byly vytvořeny pomocí dat z experimentu (6.1, 6.2, 6.4 a 6.5). Tyto grafy značí průběhy teplot ve všech měřeních na předem označených místech. Tzn. od teplot na zahřívací podložce až po senzory umístěné na spodní části vzorku. Ve všech grafech jsou barevně odlišeny senzory umístěné ve stejné výšce (na obvodu - se stejným koncovým číslem) a typem čáry jednotlivé svislé řady (se stejným označením - např. řada T_{ar}).

Samostatně byly vyhodnoceny i výsledky zjištěné při porovnání senzorů umístěných na dolní straně vzorku.

9.6.2 Výsledky simulace

Při vyhodnocování dat ze simulace bylo využito nejenom zjištěných hodnot v předem definovaných časových intervalech, jak lze vidět na 6.9, 6.15, 6.15 a 6.18, ale také grafických výsledků 6.7, 6.10, 6.13 a 6.16 z programu Ansys. Hodnoty v grafech a v obrázcích pocházejí z času 28 000 s, tzn. necelých pár minut před vypnutím zahřívací podložky. Tělesa už byla důkladně prohřátá.

Vyhodnoceny byly také hustoty tepelných toků zjištěných při simulaci 6.8, 6.11, 6.14 a 6.17. Výsledky byly opět sepsány a grafy byly porovnány s grafickým zobrazením teplot. Zmíněny byly i rozdíly a jejich případné příčiny.

9.7 Porovnání experimentu a simulace

Srovnání hodnot získaných experimentem a daty ze simulace sloužilo převážně k optimalizaci simulace (jak již bylo zmíněné, naměřená teplota na zahřívací podložce byla využita jako okrajová podmínka). Srovnání proběhlo na základě hodnot v čase 28 000 s a grafických průběhů teplot.

Důraz byl kladen na případné rozdíly, jejich možné příčiny a eventuelní způsoby omezení jejich vlivu.

I přes výskyt několika nepřesností vykazovaly grafy podobné průběhy, které se shodovaly s očekávanými.

Při porovnání byla potvrzena všechna zjištění, která byla nastíněna ve vyhodnocení jednotlivých vzorků. Tato jsou popsána a shrnuta v závěru.

9.8 Závěr a výhled

V kapitole 8 byly shrnuty všechny výsledky a vyvozeny z nich vyplývající závěry. Také bylo nastíněno možné další využití a byl popsán navazující experiment.

9.8.1 Shrnutí

Tepelné chování výrobních strojů je významný faktor ovlivňující jejich přesnost a hospodárnost. Existuje řada opatření redukcí tohoto vlivu, mezi které patří i volba vhodných materiálů nebo např. integrované temperování.

V rámci bakalářské práce byly na válcových zmenšených modelech provedeny zkoušky za účelem zjištění přenosu tepla mezi armováním a betonem. Nejdříve proběhlo měření a následně simulace v programu Ansys k ověření naměřených výsledků. Již při vyhodnocování naměřených dat bylo zjištěno několik zásadních rozdílů mezi vzorky, které obsahovaly armování a těmi, které byly pouze z betonu a taky mezi jednotlivými druhy použitého betonu.

Ze všech výsledků (tzn. měření i simulace) vyplynulo, že armování má pozitivní vliv na tepelné chování a na šíření tepla v železobetonu. To se projevilo nejenom při ohřevu, který byl u vzorků s armováním nejenom rychlejší a rovnoměrnější, ale také během následného samovolného ochlazování, které opět probíhalo rychleji. U železobetonu se tedy tepelné zatížení projeví během kratší doby. Hodnota tepelného toku v armování dosahovala mnohem větších hodnot než v betonu.

Rovnoměrnější prohřívání vzorku s armováním se projevilo několika vlivy. Teplotní rozdíly v jednotlivých řadách senzorů umístěných ve stejných výškách (na obvodech) byly menší. Naproti tomu u dílů pouze z betonu docházelo v průběhu tělesa ke ztrátám a rozdíly mezi řadami byly větší. I při vyšších teplotách na zahřívací podložce byla na dolních stranách betonových vzorků naměřená nižší teplota v porovnání se vzorkem s armováním. Ovlivněny byly také rozdíly naměřené v řadách u (T_{ar} a $T_{ar,n}$) a (T_{oh}) mimo armování u dílu reprezentujícího železobeton. Ty se sice vyskytly ale byly malé vzhledem k naměřené teplotě.

Všechna měřená tělesa se prohřívala přibližně symetricky. To potvrdili hodnoty ze senzorů umístěných na protějších částech vzorků. Teploty dosahovaly podobných hodnot. Vzorky s armováním sice vykazovaly lepší tepelné chování. Docházelo u nich ale k poklesu teplot na rozhraní betonu a železa vlivem kontaktního tepelného odporu. Jeho

vliv byl posouzen pomocí senzorů snímajících teploty na obou stranách přechodu mezi jednotlivými materiály. I přes tento pokles ale byl celkový vliv armování vyhodnocen jako pozitivní.

Rozdíly byly nejenom mezi vzorky s a bez armováním, ale také mezi jednotlivými druhy měřeného betonu. U betonu Hydropol „Schwer“ došlo díky vyšší tepelné vodivosti k lepšímu prohřívání tělesa oproti Hydropol „Medium“. U naměřených dat se to projevilo více, z toho bylo usouzeno, že Hydropol Schwer má vyšší hodnotu tepelné vodivosti, než je uváděno výrobcem.

Vliv armování byl také vidět na porovnání hodnot ze senzorů T_1 a T_2 umístěných v betonu ve středu tělesa, respektive u armování. Opět bylo prokázáno, že armování vede teplo lépe, protože teplota senzoru umístěného u něj dosahovala vyšších hodnot.

Mezi naměřenými daty a hodnotami získanými pomocí simulace byly zjištěny rozdíly, a to hlavně v celkových teplotách. Ty byly u vzorků z betonu větší. Možné důvody byly vyjmenovány a posouzeny. I přes to, že se vyskytly rozdíly v dosažených teplotách, rozdíly mezi nimi byly srovnatelné v simulaci a při měření. Další rozdíl byl ve způsobu zahřívání vzorků. Při měření bylo zjištěno, že teplota uvnitř tělesa je vyšší, tzn. vzorky se prohřívaly od středu na vnější strany. Naproti tomu u simulací vzorků bez armování byla teplota na plášti vyšší než uvnitř.

Celkově odpovídají data z experimentů a simulací s očekávanými výsledky.

9.8.2 Výhled

Na začátku práce bylo zmíněno, že v dnešní době vzniká největší množství nepřesností u výrobních strojů kvůli jejich nevhodnému tepelnému chování.

V této oblasti je tedy co vylepšovat, případné optimalizace skýtají možnost zvýšení přesnosti, produktivity a kvality. Jako jedna z možností se nabízí využití konstrukcí z železobetonu. Tato konstrukce je vhodná kvůli výborné tuhosti a tlumení vibrací. Pomocí armování a systému temperování by bylo možné dosáhnout také rovnoměrnějšího tepelného zatížení (ať už pomocí ohřívání vybraných míst, nebo naopak jejich ochlazením), a tím kompenzovat chyby vznikající vlivem střídajících se a časově závislých teplotních polí v rámech výrobních strojů.

Zjišťování a posuzování vlivu přenosu tepla mezi armováním a betonem bylo pouze prvním krokem v projektu, který se zabývá vývojem nového, tepelně-energeticky optimalizovaného lože výrobního stroje s integrovaným temperováním. Pro tento projekt byla během tohoto měření získána cenná data, která budou dále použita v dalším výzkumu.

Na tuto práci bude navazovat další měření, které bude sloužit k určení správné hodnoty tepelné vodivosti u Hydropolu „Schwer“. Hodnota, která byla použita v simulacích neodpovídá reálné hodnotě, která byla dodána výrobcem. Pouze s pomocí správným materiálových vlastností je možné úspěšně pokračovat v projektu a získat v jeho průběhu data, která budou přínosná pro další vývoj v této oblasti.

Experiment k určení λ Hydropol „Schwer“

Přesnější hodnotu tepelné vodivosti Hydropolu „Schwer“, která bude odpovídat naměřeným výsledkům, lze zjistit dvěma způsoby. První z nich je pomocí numerického výpočtu z diferenciální rovnice vedení tepla. Druhá spočívá ve využití simulace na bázi MKP. V

obou případech jsou potřeba okrajové podmínky. Nejjednodušší varianta je naměření teploty na vzorcích. Proto bylo přistoupeno k experimentu.

Během něj byly využity dva kvádry, jeden z Hydropolu „Medium“ a druhý „Schwer“. Jejich rozměry byly $200 \times 200 \times 100 \text{ mm}$. Na každém kvádru bude umístěna zahřívací podložka. Délka ohřevu je přibližně 8 hodin, poté následuje samovolné ochlazování. Až po jeho skončení lze měřit znovu. Aby se vyloučily nepřesnosti způsobená rozdílnými tepelnými výkony podložek, bude měřeno dvakrát. Po prvním měření budou podložky vyměněné. Na vzorcích budou podložky přidržené pomocí zatěžovacích desek, které byly použité již při hlavním měření. K měření teplot slouží u každého vzorku celkově čtyři odporové snímače teploty Pt100. Pozice jsou vhodně zvoleny, aby byla získána všechna potřebná data. Jeden na zatěžovací desce, další na zahřívací podložce, aby bylo možné přesně určit teplotu při ohřevu. Zbylé dva senzory patří na zahřívání vzorek. Důležité je změřit rozdíly teplot při prostupu tělesem, proto je jeden senzor umístěný na boční straně vzorku u horní hrany a druhý na dolní straně přímo proti zahřívací podložce.

Naměřené teploty budou následně využity jako okrajové podmínky prvního druhu, tzn. známe umístění a velikosti teplot na vybraných místech. Další okrajovou podmínkou bude konvekce neboli okrajová podmínka třetího druhu. Ta probíhá na dolní, bočních a horní straně, pokaždé s jinými zvolenými hodnotami. Pomocí těchto okrajových podmínek lze vyřešit vzniklou soustavu diferenciálních rovnic pro λ , tzn. pro tepelnou vodivost Hydropolu „Schwer“.

Druhá možnost je simulace. V ní by byly zadány teploty na HM a hodnoty konvekce jako okrajové podmínky a je sledováno při jakých hodnotách tepelné vodivosti a kontaktních odporech je dosaženo hodnot získaných při měření.

Kapitel 10

Anlagenverzeichnis

In der Bachelorarbeit

- Messverstärker QuantumX MX840B
- Temperatursensor Pt100
- Berechnung der Messunsicherheiten

Datenträger

Ordner	Beschreibung
Berechnung	Berechnungen des Leitungswiderstandes
Messung	Gemessene Daten und Tabelle mit Messunsicherheiten
Simulation	Simulationen als Archiv

Kapitel 11

Anhang

11.1 Messverstärker QuantumX MX840B

Messverstärkern, die bei der Messung eingesetzt werden, sind Universal-Messverstärkermodule QuantumX MX840B mit 8 Anschlüsse pro Modul, d. h. mit 8 Kanäle pro Modul (zu sehen im Abb 11.1). An jeden Kanal kann ein Sensor und Aufnahme von 17 verschiedenen Sensortechnologien angeschlossen werden. Die werden dann automatisch und sofort erkannt durch die „Plug & Measure“ Technologie, d. h. die Rüstzeiten im Prüfstand werden erheblich minimiert, deshalb ist dieser Messverstärker für häufig wechselnde Messaufgaben eine ideale Wahl.

Anderer Vorteil, der zur Anwendung führt, ist die Möglichkeit mehrere Module nacheinander zu verbinden, was bei unserer Messaufgabe notwendig ist. Das erfolgt in unterschiedlichen Topologien (zentral, dezentral, hybrid), sowie per Anschluss an PC (in unser Fall mit der Software HBM Catman) oder Datenrekorder.

Die präzise und zuverlässige Messung ist durch folgende technische Spezifikationen gewährleistet.

- robuste Auslegung und weite Umgebungstemperaturbereich -20°C bis 65°C
- 24-Bit A/D-Wandler pro Kanal
- Individuelle Messraten bis 40 kS/S
- Genauigkeitsklasse $0,05\%$



Abbildung 11.1 Universal-Messverstärkermodule QuantumX MX840B [40]

11.2 Temperatursensor Pt100

Ist einer der wichtigsten und meist verbreitet Temperatursensoren. Man kann Pt100 zu PTC-Widerständen (d. h. Widerstandsthermometern, die einen positiven Temperaturkoeffizienten aufwiesen. Mit steigender Temperatur steigt auch den Widerstand) zuordnen. Aus verschiedenen Gründen, z. B. die hohe chemische Beständigkeit, verwendet man Platin als Material für solche temperaturabhängige Widerstände. Messung mit Pt100 bietet wesentliche Vorteile für die industrielle Nutzung gegenüber anderen Temperaturmessverfahren. Wenn ein Pt100 kaputt geht, ist der Austausch wegen der geringen Grenzabweichungen meist ohne Neukalibrierung möglich.

11.2.1 Eigenschaften

Pt100 verfügt über ein Widerstand von 100Ω bei 0°C . Mit steigender Temperatur steigt auch den Widerstand (z. B. bei Pt1000 ist der Widerstand bei 0°C 1000Ω). Für Pt100 gelten die Gleichungen 5.1 und 5.2, die die Widerstandskennlinie (Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur) beschreiben.

- Für den Temperaturbereich -200°C bis 0°C :

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + C(t - 100^\circ\text{C})t^3) \quad (11.1)$$

- Für den Temperaturbereich 0°C bis 850°C :

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (11.2)$$

Mit folgenden Konstanten:

$$\begin{aligned} A &= 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \\ B &= -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2} \\ C &= -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4} \end{aligned}$$

Da die Temperatur nicht immer ganz genau gemessen ist, existieren sogenannte Grenzabweichungen, die die Abhängigkeit des zulässigen Temperaturfehlers dt von der realen Temperatur t_r beschreiben. Dazu wird man Pt100 in 4 Genauigkeitsklassen gemäß die erlaubten Grenzabweichungen unterteilen (Tab. 11.1 und Abb. 11.2).

Tabelle 11.1 Genauigkeitsklassen von Pt100 laut [39]

Klasse	Grenzabweichung [$^\circ\text{C}$]	Gültigkeitsbereich [$^\circ\text{C}$]
AA	$\pm(0,10 + 0,0017 t)$	-50 bis $+250$
A	$\pm(0,15 + 0,0020 t)$	-100 bis $+450$
B	$\pm(0,30 + 0,0050 t)$	-196 bis $+600$
C	$\pm(0,60 + 0,0100 t)$	-196 bis $+600$

Mittels Pt100 kann nicht die Temperatur sondern nur die Änderung des Widerstandswerts gemessen werden. Um die Temperatur umzurechnen, dient für Temperaturen über 0°C folgende Formel, die aus der Gleichung 5.2 abgeleitet wurde.:

$$t_r = \frac{-AR_0 + \sqrt{(AR_0)^2 - 4BR_0(R_0 - R)}}{2BR_0} \quad (11.3)$$

A und B sind konstanten, die in den Gleichungen 5.1 und 5.2 benutzt werden, R_0 Widerstand bei 0°C , R Widerstand bei gemessene Temperatur, t die gemessene Temperatur.

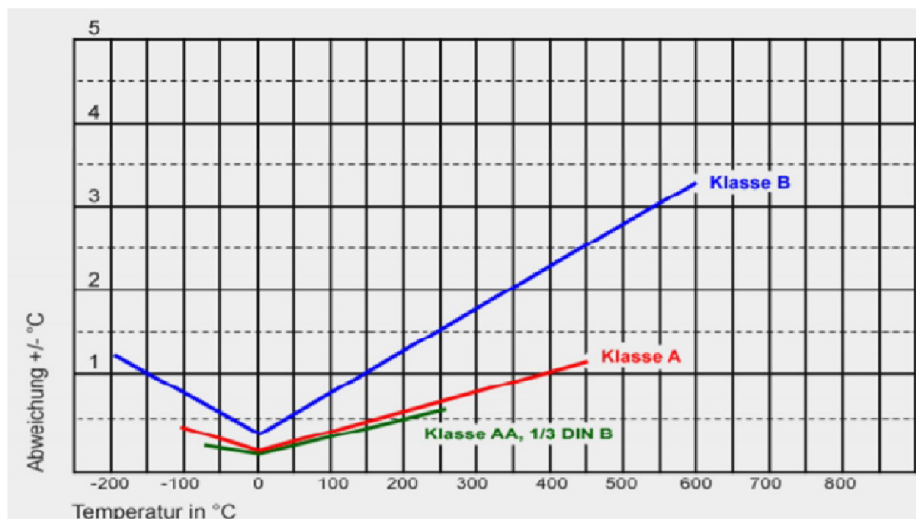


Abbildung 11.2 Genauigkeitsklassen von Pt100 [41]

11.2.2 Pt100-Messschaltungen

Gemessenes Wert von Sensor muss durch die elektrische Leitung zum auswertenden Messinstrument weitergeleitet. In der Praxis erfolgt die Übertragung meistens über große Entfernungen. Dadurch erhöht sich den Leitungswiderstand, der einen wesentlichen Einfluss auf dem Messergebnis hat. Bei der Zweileiterschaltung kann das bedeutenden Messfehler verursachen. Bei der Messauswertung wird deren Einfluss beachtet. Um den Messfehler zu vermeiden, werden in der Industrie hauptsächlich Drei- und Vierleiterschaltungen eingesetzt.

1) Zweileiterschaltung

Einfachste Möglichkeit, wie kann man einen Sensor anbringen. Unterschiedliche Widerstände (wie Mess- und Übergangswiderstände) und Leitungswiderstand führen dazu, dass die Temperaturanzeige höheres Wert als die abgeleiteten Messwiderstand zeigt. Bei geringen Entfernungen ist die Kompensation dieser Abgleich noch möglich.

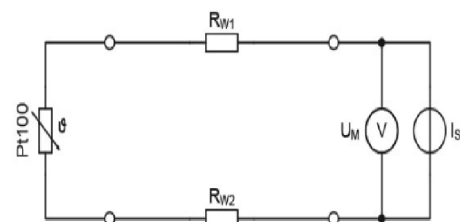


Abbildung 11.3 Pt100 Zweileiterschaltung [42]

2) Dreileiterschaltung

In der Industrie am häufigsten eingesetzte Methode. Im Gegensatz zu Zweileiterschaltung wird das Messstrom über eine zweite Leitung getrennt zugeführt, darum wird ein separater Messkreis eingerichtet. Vollständige Kompensation von Messabweichungen kann auch über große Entfernungen erfolgen. Abgleich des Leitungswiderstands ist nicht notwendig.

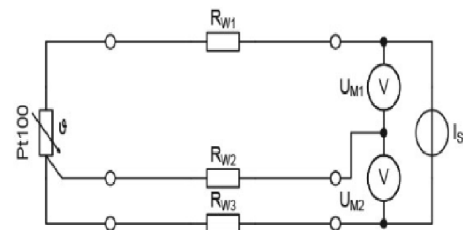


Abbildung 11.4 Pt100
Dreileiterschaltung [42]

3) Vierleiterschaltung

Falls präzise und exakte Temperaturmessung gewünscht ist, kommt zu den Einsatz von Vierleiterschaltung. In beiden Zweigen wird gleichzeitig den Messstrom versorgt. Messung der Spannungsabfall kann an den beiden Zweigen durchgeführt werden. Messgenauigkeit ist groß, da die Messabweichungen vollständig eliminiert werden können (gilt auch für weite Strecken).

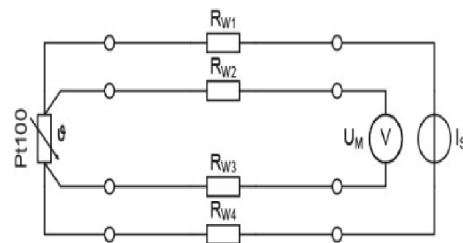


Abbildung 11.5 Pt100
Vierleiterschaltung [42]

11.2.3 Mögliche Messfehler und Messgenauigkeit

Bei der Messung mit Pt100 können auch Fehlern eintreten. Die wichtigste Ursachen sind Folgende:

- mangelhafter Isolationswiderstand
- parasitärer Thermospannungen (entsteht durch den Einsatz verschiedener Materialien)
- Eigenerwärmung des Sensors
- Hysterese

11.2.4 Eingegossene Sensoren

Sensoren, die in den Probekörpern eingegossen wurden, sind Kabeltemperaturfühler Pt100/B/2 FEP/Sil von der Firma B+B Thermo-Technik. Dieser Temperaturfühler findet viele Anwendungen, egal ob bei der Messung flüssige, gasförmige oder feste Medien, d. h. in Heizungstechnik, Klimatechnik oder Wärmepumpen. Abb. 11.6 zeigt die technischen Daten und das Aussehen des Sensors. Bei diesen Sensoren muss die Messunsicherheit, die durch den Leitungswiderstand entstand, beachtet werden. [43]



Technische Daten	
Messwertempfänger	Pt100
Genauigkeit	Klasse B
Empfohlener Messstrom	0,3 bis 1 mA
Messbereich	-40...+180°C
Schaltungsart	2-Leiteranschluss
Nennlänge	50 mm
Durchmesser	6 mm
Material Schutzhülse	Edelstahl 1.4571
Elektrischer Anschluss	freie Enden 30 mm Aderenden verzinkt
Anschlussleitung	Länge 2000 mm Querschnitt 2 x 0,22 mm ² Isolation FEP/Sil
Schutzart	IP65

Abbildung 11.6 Eingegossener Sensor [43]

11.3 Messunsicherheiten

11.3.1 Leitungswiderstand

Die folgenden Seiten zeigen die Berechnungen der Messunsicherheit, die durch den Leiter bei gemessener Temperatur entstanden sind.

11.3.2 Gesamtmessunsicherheit

Schließlich die Tabellen mit den Gesamtmessunsicherheiten.

Leitungswiderstand Hydropol "Medium"

Spezifischer Widerstand

$$\rho_0 := 0.0178 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

spezifischer Widerstand bei 0°C (Cu)

$$\alpha := 0.00392 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

linearer Widerstandstemperaturkoeffizient (Cu)

$$t_{1max} := 48.20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{2max} := 48.94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{Bmax} := 52.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Max. gemessene Temperaturen Sensor:

T1,

T2,

TB, innen

$$l := 2000 \text{ mm}$$

Länge des Leiters

$$A_L := 2 \cdot 0.22 \text{ mm}^2$$

Querschnitt des Leiters

Sensor T1

$$\rho_1 := \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_{1max}) = 0.021 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Sp. Widerstand bei gemessene Temperatur

$$R_1 := \rho_1 \cdot \frac{l}{A_L} = 0.096 \text{ } \Omega$$

Widerstand des Leiters

Sensor T2

$$\rho_2 := \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_{2max}) = 0.021 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Sp. Widerstand bei gemessene Temperatur

$$R_2 := \rho_2 \cdot \frac{l}{A_L} = 0.096 \text{ } \Omega$$

Widerstand des Leiters

Sensor TB, innen

$$\rho_B := \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_{Bmax}) = 0.021 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Sp. Widerstand bei gemessene Temperatur

$$R_B := \rho_B \cdot \frac{l}{A_L} = 0.097 \text{ } \Omega$$

Widerstand des Leiters

Temperatursänderung

$$R_0 := 100 \text{ } \Omega$$

Nennwiderstand von Pt100

$$A := 3.908 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B := -5.775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

Konstanten für Pt100

Sensor T1

$$R_{t1} := R_0 \cdot (1 + A \cdot t_{1max} + B \cdot t_{1max}^2) = 118.702 \text{ } \Omega$$

$$\Delta R_1 := R_1$$

$$\Delta t_1 := \frac{\Delta R_1}{\alpha \cdot R_{t1}} = 0.207 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Änderung der Temperatur durch den Leiter

Sensor T2

$$R_{t2} := R_0 \cdot (1 + A \cdot t_{2max} + B \cdot t_{2max}^2) = 118.987 \, \Omega$$

$$\Delta R_2 := R_2$$

$$\Delta t_2 := \frac{\Delta R_2}{\alpha \cdot R_{t2}} = 0.207 \, C^\circ$$

Änderung der Temperatur durch den Leiter

Sensor TB

$$R_{tB} := R_0 \cdot (1 + A \cdot t_{Bmax} + B \cdot t_{Bmax}^2) = 120.262 \, \Omega$$

$$\Delta R_B := R_B$$

$$\Delta t_B := \frac{\Delta R_B}{\alpha \cdot R_{tB}} = 0.207 \, C^\circ$$

Änderung der Temperatur durch den Leiter

Ergebnisse (Einfluss des Widerstandes)

$$t1 = (48,20 \pm 0,21) \, ^\circ C \dots \text{cca } 0,44 \, \%$$

$$t2 = (48,94 \pm 0,21) \, ^\circ C \dots \text{cca } 0,43 \, \%$$

$$tB = (52,25 \pm 0,21) \, ^\circ C \dots \text{cca } 0,40 \, \%$$

Leitungswiderstand Hydropol "Schwer"

Spezifischer Widerstand

$$\rho_0 := 0.0178 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

spezifischer Widerstand bei 0°C (Cu)

$$\alpha := 0.00392 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

linearer Widerstandstemperaturkoeffizient (Cu)

$$t_{1max} := 46.48 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{2max} := 46.04 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_{Bmax} := 47.86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Max. gemessene Temperaturen Sensor:

T1,

T2,

TB, innen

$$l := 2000 \text{ mm}$$

Länge des Leiters

$$A_L := 2 \cdot 0.22 \text{ mm}^2$$

Querschnitt des Leiters

Sensor T1

$$\rho_1 := \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_{1max}) = 0.021 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Sp. Widerstand bei gemessene Temperatur

$$R_1 := \rho_1 \cdot \frac{l}{A_L} = 0.096 \text{ } \Omega$$

Widerstand des Leiters

Sensor T2

$$\rho_2 := \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_{2max}) = 0.021 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Sp. Widerstand bei gemessene Temperatur

$$R_2 := \rho_2 \cdot \frac{l}{A_L} = 0.096 \text{ } \Omega$$

Widerstand des Leiters

Sensor TB, innen

$$\rho_B := \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_{Bmax}) = 0.021 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Sp. Widerstand bei gemessene Temperatur

$$R_B := \rho_B \cdot \frac{l}{A_L} = 0.096 \text{ } \Omega$$

Widerstand des Leiters

Temperatursänderung

$$R_0 := 100 \text{ } \Omega$$

Nennwiderstand von Pt100

$$A := 3.908 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B := -5.775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

Konstanten für Pt100

Sensor T1

$$R_{t1} := R_0 \cdot (1 + A \cdot t_{1max} + B \cdot t_{1max}^2) = 118.04 \text{ } \Omega$$

$$\Delta R_1 := R_1$$

$$\Delta t_1 := \frac{\Delta R_1}{\alpha \cdot R_{t1}} = 0.207 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Änderung der Temperatur durch den Leiter

Sensor T2

$$R_{t2} := R_0 \cdot (1 + A \cdot t_{2max} + B \cdot t_{2max}^2) = 117.87 \, \Omega$$

$$\Delta R_2 := R_2$$

$$\Delta t_2 := \frac{\Delta R_2}{\alpha \cdot R_{t2}} = 0.207 \, C^\circ$$

Änderung der Temperatur durch den Leiter

Sensor TB

$$R_{tB} := R_0 \cdot (1 + A \cdot t_{Bmax} + B \cdot t_{Bmax}^2) = 118.571 \, \Omega$$

$$\Delta R_B := R_B$$

$$\Delta t_B := \frac{\Delta R_B}{\alpha \cdot R_{tB}} = 0.207 \, C^\circ$$

Änderung der Temperatur durch den Leiter

Ergebnisse (Einfluss des Widerstandes)

$$t1 = (46,48 \pm 0,21) \, ^\circ C \dots \text{cca } 0,45 \, \%$$

$$t2 = (46,04 \pm 0,21) \, ^\circ C \dots \text{cca } 0,46 \, \%$$

$$tB = (47,86 \pm 0,21) \, ^\circ C \dots \text{cca } 0,44 \, \%$$

Messunsicherheiten - Hydropol "Medium"											
Gemessene Werte				Ergebnisse							
Probekörper mit der Amierung				Grenzabweichungen		Messfehler Kabel		Messverstärk 0,05%		Gesamtmessunsicherheit	
Max Temp [°C]	Sensor	Zeile	Zeit [s]	Klasse B [°C]	%	Vid. Temp. [°C]	%	[°C]	%	[°C]	%
57,29	TAr,1	14222	28626	0,59	1,02	x	x	0,03	0,05	0,59	1,02
52,37	TAr,2	14364	28911	0,56	1,07	x	x	0,03	0,05	0,56	1,07
46,55	TAr,3	15984	32151	0,53	1,14	x	x	0,02	0,05	0,53	1,15
43,83	TAr,4	18604	37391	0,52	1,18	x	x	0,02	0,05	0,52	1,19
57,24	Toh,1	14225	28632	0,59	1,02	x	x	0,03	0,05	0,59	1,03
54,49	Toh,2	14373	28929	0,57	1,05	x	x	0,03	0,05	0,57	1,05
47,98	Toh,3	15660	31503	0,54	1,13	x	x	0,02	0,05	0,54	1,13
44,10	Toh,4	18250	36683	0,52	1,18	x	x	0,02	0,05	0,52	1,18
56,88	TAr,n1	14224	28630	0,58	1,03	x	x	0,03	0,05	0,59	1,03
53,10	TAr,n2	14338	28859	0,57	1,06	x	x	0,03	0,05	0,57	1,07
46,34	TAr,n3	15910	32003	0,53	1,15	x	x	0,02	0,05	0,53	1,15
44,37	TAr,n4	18229	36641	0,52	1,18	x	x	0,02	0,05	0,52	1,18
63,67	THM	14211	28604	0,62	0,97	x	x	0,03	0,05	0,62	0,97
44,55	Tu	18608	37399	0,52	1,17	x	x	0,02	0,05	0,52	1,17
48,20	T1	17410	35003	0,54	1,12	0,21	0,44	0,02	0,05	0,58	1,21
48,94	T2	16180	32543	0,54	1,11	0,21	0,43	0,02	0,05	0,58	1,19
Probekörper nur Beton				Grenzabweichungen		Messfehler Kabel		Messverstärk 0,05%		Gesamtmessunsicherheit	
Max Temp [°C]	Sensor	Zeile	Zeit [s]	Klasse B [°C]	%	Vid. Temp. [°C]	%	[°C]	%	[°C]	%
57,38	T11	14571	29325	0,59	1,02	x	x	0,03	0,05	0,59	1,02
46,75	T12	17381	34945	0,53	1,14	x	x	0,02	0,05	0,53	1,14
43,69	T13	20709	41601	0,52	1,19	x	x	0,02	0,05	0,52	1,19
56,00	T21	14723	29629	0,58	1,04	x	x	0,03	0,05	0,58	1,04
48,48	T22	16694	33571	0,54	1,12	x	x	0,02	0,05	0,54	1,12
43,74	T23	19911	40005	0,52	1,19	x	x	0,02	0,05	0,52	1,19
87,62	THMB	13914	28010	0,74	0,84	x	x	0,04	0,05	0,74	0,84
44,75	TuB	21783	43749	0,52	1,17	x	x	0,02	0,05	0,52	1,17
52,25	TB,innen	15649	31481	0,56	1,07	0,21	0,40	0,03	0,05	0,60	1,15

Messunsicherheiten - Hydropol "Schwer"											
Gemessene Werte				Ergebnisse							
Probekörper mit der Amierung				Grenzabweichungen		Messfehler Kabel		Messverstärk 0,05%		Gesamtmessunsicherheit	
Max Temp [°C]	Sensor	Zeile	Zeit [s]	Klasse B [°C]	%	Vid. Temp. [°C]	%	[°C]	%	[°C]	%
45,25	TAr,1	14221	28624	0,53	1,16	x	x	0,02	0,05	0,53	1,16
42,99	TAr,2	14280	28743	0,51	1,20	x	x	0,02	0,05	0,52	1,20
53,26	TAr,3	15703	31589	0,57	1,06	x	x	0,03	0,05	0,57	1,06
50,79	TAr,4	17918	36019	0,55	1,09	x	x	0,03	0,05	0,55	1,09
45,52	Toh,1	14226	28634	0,53	1,16	x	x	0,02	0,05	0,53	1,16
43,30	Toh,2	14396	28975	0,52	1,19	x	x	0,02	0,05	0,52	1,19
59,03	Toh,3	16426	33035	0,60	1,01	x	x	0,03	0,05	0,60	1,01
43,75	Toh,4	18584	37351	0,52	1,19	x	x	0,02	0,05	0,52	1,19
46,48	TAr,n1	14228	28638	0,53	1,15	x	x	0,02	0,05	0,53	1,15
46,04	TAr,n2	14280	28743	0,53	1,15	x	x	0,02	0,05	0,53	1,15
20,37	TAr,n3	15600	31383	0,40	1,97	x	x	0,01	0,05	0,40	1,97
20,41	TAr,n4	17835	35853	0,40	1,97	x	x	0,01	0,05	0,40	1,97
20,31	THM	14215	28612	0,40	1,98	x	x	0,01	0,05	0,40	1,98
20,28	Tu	17779	35741	0,40	1,98	x	x	0,01	0,05	0,40	1,98
20,90	T1	15835	31853	0,40	1,94	0,21	1,00	0,01	0,05	0,46	2,18
20,51	T2	16945	34073	0,40	1,96	0,21	1,02	0,01	0,05	0,45	2,21
Probekörper nur Beton				Grenzabweichungen		Messfehler Kabel		Messverstärk 0,05%		Gesamtmessunsicherheit	
Max Temp [°C]	Sensor	Zeile	Zeit [s]	Klasse B [°C]	%	Vid. Temp. [°C]	%	[°C]	%	[°C]	%
53,98	T11	14759	29701	0,57	1,06	x	x	0,03	0,05	0,57	1,06
46,24	T12	16331	32845	0,53	1,15	x	x	0,02	0,05	0,53	1,15
42,83	T13	19886	39955	0,51	1,20	x	x	0,02	0,05	0,51	1,20
52,94	T21	14712	29607	0,56	1,07	x	x	0,03	0,05	0,57	1,07
45,99	T22	16590	33363	0,53	1,15	x	x	0,02	0,05	0,53	1,15
43,23	T23	20177	40537	0,52	1,19	x	x	0,02	0,05	0,52	1,20
73,08	THMB	14350	28883	0,67	0,91	x	x	0,04	0,05	0,67	0,91
43,52	TuB	19882	39947	0,52	1,19	x	x	0,02	0,05	0,52	1,19
47,86	TB,innen	16234	32651	0,54	1,13	0,21	0,44	0,02	0,05	0,58	1,21

Literaturverzeichnis

- [1] *SFB/TR 96. T02: Effiziente Gestelltemperierung*. URL: <http://141.76.19.93/SFBweb/index.php/projektbereich-t-transferprojekte/t02/> (besucht am 18.06.2019).
- [2] Hirsch, A.: *Werkzeugmaschinen. Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [3] Skolaut, W.: *Maschinenbau. Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium*. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [4] *Drehmaschine*. URL: https://www.steinershopping.at/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/3/4/3400923_D320_08_1.jpg (besucht am 18.07.2019).
- [5] *Horizontale fräsmaschine*. URL: http://img.directindustry.de/images_di/photo-g/40875-11036397.jpg (besucht am 18.07.2019).
- [6] *Bearbeitungszentrum*. URL: https://www.stahlwerk-cnc.com/media/catalog/product/cache/55/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/1/8/181187-cnc-vertikal-bearbeitungszentrum-lupus-700_dt01.jpg (besucht am 18.07.2019).
- [7] *Vertikale Drehmaschine*. URL: http://www.tos-kurim.cz/images/portfolio/CKD_SKDY/CKD_SKDY.jpg (besucht am 18.07.2019).
- [8] Křížová, K.: *Betonové konstrukce I. pro SPŠ a SOU stavební*. 1. Aufl. Praha: Sobotáles, 2010.
- [9] *Geschichte des Betons*. URL: <https://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/geschichte-des-betons/> (besucht am 20.05.2019).
- [10] *Beton Schnitt*. URL: https://www.baunetzwissen.de/imgs/2/0/1/9/8/6/1/Bild_1_Dyckerhoff_Nanodur_Beton_E80__Schnittbild_-44681f5d6bdb17d2.jpg (besucht am 18.05.2019).
- [11] *Stahlbeton*. URL: <http://www.marsbau.at/wp-content/uploads/2014/10/stahlbeton.jpg> (besucht am 18.05.2019).
- [12] *Maschinenbauteile aus Zementbeton*. URL: <https://durcrete.de/> (besucht am 26.05.2019).
- [13] *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2. Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. 2008-08. Berlin: Beuth-Verlag, 2008.

- [14] *Der Baustoff Beton und seine Eigenschaften*. URL: <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/eigenschaften/der-baustoff-beton-und-seine-eigenschaften-150942> (besucht am 26.05.2019).
- [15] Bohm, J. et al.: *Einführung in die Kristallographie*. 17. Aufl. Verlag Technik, 1998.
- [16] *DIN 488-1, Betonstahl - Teil 1. Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung*. 2009-08. Berlin: Beuth-Verlag, 2009.
- [17] *Stahlbeton beim Hausbau*. URL: <https://www.hausjournal.net/stahlbeton-beim-hausbau> (besucht am 26.05.2019).
- [18] *Grundstoffe des Bauens. Was ist Polymerbeton und wofür wird er verwendet?* 2017. URL: <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/grundstoffe-des-bauens/polymerbeton-definition-eigenschaften-einsatzbereiche-entwaesserungsrinnen-rohre-kabelkanaele-lichtschaechte-treppenstufen-fassadentafeln-fensterbaenke/> (besucht am 14.05.2019).
- [19] *Hochleistungsbeton*. URL: <https://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/hochleistungsbeton/> (besucht am 23.05.2019).
- [20] *THERMODYNAMICS: AN ENGINEERING APPROACH*. 8th ed. New York (NY): McGraw-Hill Education, 2015.
- [21] *Vorlesungen, TU Brunn. Thermomechanik*. URL: <https://drive.google.com/drive/u/1/folders/0B7nmoC7ND2vvRGt1SjNRQ180T0k> (besucht am 11.05.2019).
- [22] *Thermodynamische Systeme*. URL: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSV15ayEYUNmv7PYu0gdDxqtw-hAdJ4IG2UiXsKCNsa3p4PhjB0> (besucht am 09.06.2019).
- [23] Karwa, K.: *Heat and mass transfer*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [24] Gleich, S.: „Simulation des thermischen Verhaltens spanender Werkzeugmaschinen in der Entwurfsphase“. Dissertationsarbeit. Zwickau: Technische Universität Chemnitz, 2008.
- [25] *Physikalische Grundlagen. Grundgleichungen der Wärmeübertragung*. URL: http://www.cae-wiki.info/wikiplus/images/1/18/Teil1_2_090219.pdf (besucht am 18.05.2019).
- [26] *Genauigkeit von Vorschubachsen*. URL: https://www.heidenhain.de/fileadmin/pdb/media/img/349843-01-A-01_Genauigkeit_von_Vorschubachsen_de.pdf (besucht am 18.07.2019).
- [27] Regel, J.: „Bewertung konstruktiver und kompensatorischer Maßnahmen zur thermo-sensitiven Auslegung von Werkzeugmaschinenstrukturen“. Dissertationsarbeit. Auerbach/Vogtl, Technische Universität Chemnitz, 2018.
- [28] *Thermo-Energetische Gestaltung von Werkzeugmaschinen. - Begleitender Tagungsband - 4. Kolloquium zum SFB/TR 96*. Dresden, 2017. URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-227564> (besucht am 17.06.2019).
- [29] Knorrenschild, M.: *Numerische Mathematik. Eine beispielorientierte Einführung*. 6. Aufl. München: Hanser, 2017.

- [30] Glänzel, J.: „Korrektur thermoelastischer Verformungen durch den Einsatz der adaptiven FEM“. Dissertationsarbeit. Auerbach, Vogtl: Technische Universität Chemnitz, 2014.
- [31] Klein, B.: *FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2007.
- [32] *About ANSYS*. URL: <https://www.ansys.com/about-ansys> (besucht am 25.06.2019).
- [33] *FEM für Praktiker 3. Temperaturfelder*. 5. Aufl. Renningen-Malmsheim: Expert-Verl., 2009.
- [34] *Forschungsprojekt. Klimazelle*. 2019. URL: <https://www.iwu.fraunhofer.de/de/forschung/leistungsangebot/kompetenzen-von-a-bis-z/werkzeugmaschine/Thermoforschung/klimazelle.html> (besucht am 11.06.2019).
- [35] *Presseinformation. Werkzeugmaschinen im Check-Up*. 2018. URL: https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2018/Februar/werkzeugmaschinen_im_check-up.html (besucht am 11.06.2019).
- [36] *Framag. Maschinengestelle*. URL: <https://www.framag.com/index.php?modul=catalog%5C&catalogId=4826%5C&inc1=10%5C&sprache=deu> (besucht am 23.05.2019).
- [37] Marek, J.: *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. 3. Aufl. Praha: MM publishing, 2014.
- [38] *Framag. Thermostabile Werkzeugmaschinen*. URL: <https://www.framag.com/de/produkte/maschinengestelle/thermostabilitaet-4783.html> (besucht am 22.05.2019).
- [39] *DIN EN 60751. Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren*. 2009-05. Berlin: Beuth-Verlag, 2008.
- [40] *QuantumX MX840B*. URL: <https://www.controles-essais-mesures.fr/media/actualites/2/4/8/6/doc/datasheet-quantumx-mx840b-1433399641.pdf> (besucht am 04.07.2019).
- [41] *Abweichung in °C für Pt 100 Sensoren der Klassen A; B; AA, 1/10 DIN B*. URL: https://www.electronic-sensor.de/attachments/article/68/ti-5_kennlinien-pt100-widerstaende-nach-toleranzklassen.pdf (besucht am 04.07.2019).
- [42] *Funktionsweise und Technologie von Temperatursensoren*. URL: https://www.baumer.com/de/de/service-support/know-how/funktionsweise/funktionsweise-und-technologie-von-temperatursensoren/a/know-how_function_temperature-sensors (besucht am 15.05.2019).
- [43] *B+B sensors. Kabelfühler 1xPt100/B/2 FEP/Sil*. URL: <https://shop.bb-sensors.com/Messtechnik-je-Branche/Medizintechnik-Pharmatechnik/Kabelfuehler-1xPt100-B-2-FEP-Sil.html?listtype=search%5C&searchparam=kabelf%5C%C3%5C%BChler> (besucht am 03.05.2019).

Selbstständigkeitserklärung

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Tschechisch/Česky

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je mým vlastním dílem, byla zpracována pod vedením přidělených vedoucích a na základě literatury, uvedené v seznamu zdrojů na uvedených místech.

Englisch/English

I hereby declare that the thesis submitted is my own unaided work. All sources used are acknowledged as references.