



Beleg zur Auslegung und Konstruktion einer Getriebe- welle

T. Rosenlöcher, B. Schlecht

Lehrstuhl Maschinenelemente, Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden

Abstract

Im Fach Maschinenelemente wird die Vermittlung des Lehrinhalts in den Vorlesungen, den Übungen und dem Vorrechnen durch die semesterübergreifende Erstellung einer Belegarbeit ergänzt, in dem die gewonnenen Erkenntnisse zur Auslegung und Gestaltung von Maschinenelementen selbständig zur Gestaltung einer Baugruppe eingesetzt werden sollen. Die Betreuung der Belegarbeit wurde um die Möglichkeit einer wöchentlichen Abgabe und Korrektur von Zwischenergebnissen ergänzt, die aufgrund der Vielzahl an erforderlichen Berechnungen und Zwischenergebnissen sowie der Anzahl der teilnehmenden Studierenden nicht händisch erfolgen kann. Die Umsetzung der Belegbewertung, die damit verbundenen Herausforderungen und gesammelten Erfahrungen sind nachfolgend zusammengefasst.

In the subject of machine elements, the teaching content covered in lectures, exercises, and preliminary calculations is supplemented by a term paper to be completed over the course of the semester, in which the knowledge gained on the design and construction of machine elements is to be applied independently to the design of an assembly. Support for the term paper was supplemented by the option of weekly submission and correction of interim results, which cannot be done manually due to the large number of calculations and interim results required and the number of students participating. The implementation of the term paper assessment, the associated challenges, and the experience gained are summarized below.

*Corresponding author: thomas.rosenloecher@tu-dresden.de

1. Maschinenelemente

Die Studierenden des dritten und vierten Semesters erlernen an der Technischen Universität Dresden im Rahmen von drei Semesterwochenstunden Vorlesung, zwei Semesterwochenstunden Übung und einer Semesterwochenstunde Vorrechnen im Sommersemester die für den Maschinenbau wichtigen Grundkenntnisse im Fach Maschinenelemente. Zu Beginn des Wintersemesters wird in der Vorlesung auf die Ermittlung von Lastannahmen und die Festigkeitsberechnung eingegangen, welche die Grundlagen für die weiteren rechnerischen Nachweise für die verschiedenen Maschinenelemente bilden. Darauf aufbauend erlernen die Studierenden die Vorgehensweise zur Auslegung sowie die Grundregeln zur Konstruktion von Wellen, die Gestaltungsmöglichkeiten von Verbindungen zwischen Wellen und Naben sowie die Berechnungs- und Gestaltungsregeln für Schraubverbindungen, Federn und Kupplungen. Im weiteren Verlauf werden die Auslegung und Dimensionierung von Wälzlagern, Gleitlagern und Zahnradgetrieben behandelt. Die Übungen dienen zur selbständigen Anwendung des erlernten Wissens anhand von Aufgaben zu den unterschiedlichen Themengebieten. Eine detaillierte Erläuterung zu Beginn der wöchentlich stattfindenden Veranstaltungen ermöglicht einen schnellen Einstieg in die Fragestellung und unterstützt bei der Handhabung der Formeln sowie Schaubilder und bereitet die eigenständige Bearbeitung der Aufgaben vor. Das Vorrechnen im Sommersemester zeigt vertiefend die Lösungsfindung anhand von verschiedenen Berechnungsaufgaben.

Ergänzend zu den Lehrveranstaltungen für den Studiengang Maschinenbau werden die Grundlagen der Maschinenelemente für die Studiengänge Mechatronik, Regenerative Energiesysteme, Wirtschaftswissenschaft und Textil- und Konfektionstechnik als Konstruktionslehre angeboten. Aufgrund der Halbierung der Semesterwochenstunden gegenüber dem Modulumfang für den Studiengang Maschinenbau werden nur ausgewählte Themen mit einem verringerten Umfang behandelt. Vor allem im Rahmen der Übungen wird deutlich, dass die von den Studierenden einbringbaren Vorkenntnisse sehr unterschiedlich sind und

bei der Einführung zu den einzelnen Lehrveranstaltungen berücksichtigt werden müssen.

2. Belegarbeit

Alle genannten Studiengänge erarbeiten im Laufe der Modullaufzeit eine Belegarbeit, in der das erworbene Wissen zur Auslegung und konstruktiven Gestaltung einer Baugruppe, bestehend aus einer Welle mit Lagerung, einem Zahnrad und einer Riemenscheibe angewendet und vertieft werden soll (Abb. 1).

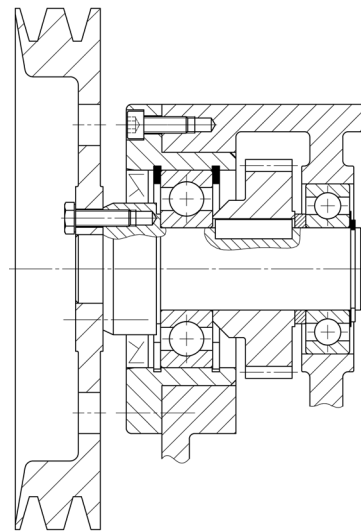


Abb. 1: Ausschnitt der Zeichnung zur Baugruppe

Die Baugruppe ist dem Studiengang Maschinenbau bereits aus Lehrveranstaltungen im zweiten Semester bekannt. Den Studierenden sind in Abhängigkeit vom ersten Buchstaben des Vor- und Nachnamens unterschiedliche Vorgaben für den zu verwendenden Wellenwerkstoff, zum Lagerabstand, der Position des Zahnrades und der Riemenscheibe, zur Leistung und zu den Verzahnungsparametern gegeben. Auf Grundlage dieser Daten müssen zur Bearbeitung des Beleges im ersten Schritt die wirkenden Kräfte am Zahnrad und an der Riemenscheibe bestimmt und die resultierenden Auflagerreaktionen ermittelt werden (Abb. 2). Mit Kenntnis der Lagerkräfte, der Biegemomente und des Torsionsmomentes kann eine überschlägige Ermittlung des erforderlichen Wellendurchmessers im Bereich der höchsten Beanspruchung erfolgen. Für den vorliegenden Mindestwert des Wellendurchmessers gilt es im Weiteren die Passfeder- bzw. Querpressverbindung auszulegen, durch

Vergrößerung des Durchmessers einen Absatz für das Festlager zu schaffen sowie die Schraubenverbindung zwischen Riemenscheibe und Welle auszulegen. Wellenabsätze und die Passfedernut stellen kritische Bereiche für eine dauerfeste Auslegung der Welle dar, so dass der Nachweis der Dauerfestigkeit an diesen zwei Stellen der Welle zu führen ist. Abschließend sind die Lagerlebensdauern für das Fest- und Loslager zu bestimmen und auf Grundlage der erarbeiteten geometrischen Parameter eine fertigungsgerechte Einzelteilzeichnung und eine Zusammenbauzeichnung der Baugruppe mit Gehäuse zu erstellen.

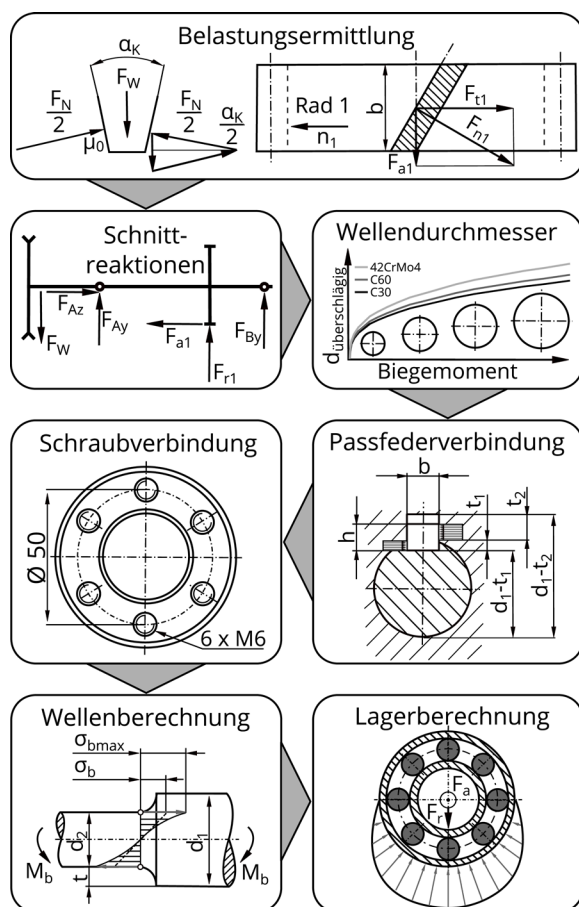


Abb. 2: Schematischer Ablauf der Bearbeitung

Abgegeben wird der Beleg mit der vollständigen Dokumentation der Berechnung, den Zeichnungen, einer Stückliste und einer Montagebeschreibung. Die Betreuung der Belegarbeit erfolgt in den Übungen, in einem Forum in der Lernplattform OPAL und zum Teil individuell nach Lehrveranstaltungen, in persönlichen Gesprächen und E-Mails. Aufgrund der langen Bearbeitungszeit über die gesamte Modullaufzeit haben die Studierenden in der Vergangen-

heit tendenziell sehr spät mit der Bearbeitung begonnen, wodurch vor allem in den letzten Wochen vor dem Abgabetermin durch das Aufkommen einer Vielzahl an Fragen die Durchführung von Übungen erschwert wurde und die Belegbetreuung einen enormen zeitlichen Aufwand, konzentriert auf einen kurzen Zeitraum, mit sich brachte. Vor allem in den Übungen zur Konstruktionslehre waren mehrere zusätzliche Tutoren zur Beantwortung der Fragen erforderlich.

3. Kontinuierliche Belegbetreuung

Getrieben durch den hohen Lehr- und Betreuungsaufwand zum Ende jeder Vorlesungszeit im Wintersemester im Fach Konstruktionslehre galt es ein Werkzeug zu schaffen, welches Studierende frühzeitig dazu bewegt, den Lehrinhalt, der in den Übungen vermittelt wird, möglichst direkt im Anschluss zur Bearbeitung der Teilaufgaben des Beleges zu nutzen. Dadurch sollen sich die erarbeiteten Kenntnisse zeitnah vertiefen und festigen, offene Fragen zu den einzelnen Teilaufgaben direkt im Forum oder der Lehrveranstaltung klären lassen, idealerweise vergleichbare Fortschritte bei der Bearbeitung bei allen Studierenden einstellen und Studierende vermeiden lassen, die erst kurz vor Ende der Bearbeitungszeit beginnen. Als Anreiz für die Studierenden wird eine wöchentliche Zwischenkontrolle der Ergebnisse angeboten, die jedoch aufgrund der mehr als 60 eingeschriebenen Studierenden nicht händisch erfolgen kann.

Zur Umsetzung der angestrebten Zwischenkontrollen erfolgt die vollständige Abbildung des Berechnungsvorganges für den Beleg unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Variantenvielfalt in MATLAB. Neben dem Einpflegen von Formeln, ist es erforderlich Tabellen für Passfederverbindungen, Schraubverbindungen, Toleranzen sowie Lager zu implementieren sowie Schaubilder, die nicht mit Formeln beschrieben werden können, programmtechnisch abzubilden. Den Studierenden wird eine Ergebnisübersicht als EXCEL-Tabelle zur Verfügung gestellt, in der die Berechnungsergebnisse eingetragen werden können (Abb. 3). Diese Datei kann in der Lernplattform OPAL in einen Abgabeordner bis zu einer festgelegten Abgabefrist hochgeladen werden.

Das Herunterladen der Dateien muss anschließend manuell erfolgen. Die Ergebnisübersichten liegen in einer komplexen Ordnerstruktur in einem komprimierten Archiv vor. Mit Hilfe von MATLAB werden diese Archive automatisch entpackt, eine Liste der Studierenden erstellt, die eine Datei hochgeladen haben, die Ergebnisübersichten einzeln geladen, Angaben zur Person sowie die wesentlichen Eingabedaten ausgelesen, mit Hilfe dieser Daten die Ergebnisse für die jeweilige Belegvariante berechnet, diese mit den eingetragenen Werten verglichen und die Richtigkeit mit rot bzw. grün in der Übersicht gekennzeichnet. Gleichzeitig

wird eine Bewertungstabelle erstellt, in der die Ergebnisse der Korrektur für jeden Studierenden gespeichert werden. Nach erfolgreicher Korrektur der Übersichten kann mit Hilfe eines weiteren Skriptes das Versenden der Belege als E-Mail automatisch erfolgen. Bei einem fehlerfreien Durchlauf des Korrekturprozesses ist vor allem der Umgang mit den EXCEL-Dateien rechenintensiv, so dass in Abhängigkeit von der verfügbaren Rechentechnik die Korrekturzeit zwischen 15 und 30 Sekunden pro Beleg beträgt. Eine rechenzeitorientierte Optimierung der Skripte erfolgte bisher nicht.

Ergebnisübersicht zum Beleg

Vorname:	<i>eintragen!</i>	Nachname:	<i>eintragen!</i>	Matr.-Nr.	<i>eintragen!</i>
----------	-------------------	-----------	-------------------	-----------	-------------------

Vorname (1. Z.)		a=	0 mm	M _{tan} =	0,00 Nm, Nennwert
Nachname (1. Z.)		b=	0 mm	F _w =	0,00 N für M _{tan}
		c=	0 mm	F _t =	0,00 N für M _{tan}
				F _r =	0,00 N für M _{tan}
				F _a =	0,00 N für M _{tan}

Lagerkräfte aus der Antriebsleistung berechnet:

Breite des Lagers A:	0,0 mm	Zahnradmitte - Stelle 2	0,0 mm
----------------------	--------	-------------------------	--------

Nennlast [N]		mit Betriebsfaktor [N]		mit Stoßfaktor [N]	
F _{Ax} =	0,00	F _{Bx} =	0,00	F _{Ax} =	0,00
F _{Ay} =	0,00	F _{By} =	0,00	F _{Ay} =	0,00
F _A =	0,00	F _B =	0,00	F _A =	0,00

Abb. 3: Ausschnitt aus der Ergebnisübersicht

4. Einsatz in der Praxis

Im Wintersemester 2022/23 wurde die Kontrolle der Zwischenergebnisse für Studierende im Fach Konstruktionslehre erstmalig angeboten. Um Probleme beim Ausfüllen und Austausch der Datenblätter zu vermeiden, wird die Vorlage zum Eintragen der Zwischenergebnisse zu Beginn ungeschützt zur Verfügung gestellt. Erste Herausforderungen ergeben sich in der Angabe der entsprechenden Variante zur Kontrolle der namensabhängigen Parameter. Die Angabe soll mit der Variantenummer erfolgen, häufig werden jedoch die Anfangsbuchstaben oder der Buchstabenbereich eingetragen, so dass zeitnah die freie Eingabe durch eine Auswahlliste ersetzt wird. Eine vergleichbare Vorgehensweise ist für die Eingabe der Wellen- und Bohrungstoleranzen (bspw.

H7) zum Nachrechnen des Querpresssitzes erforderlich. Weitere Herausforderungen ergeben sich durch die Verwendung des Punktes anstelle des Kommas als Dezimaltrennzeichen in den Ergebnisübersichten, da dies in dem Skript nicht von Beginn an geprüft und anstelle numerischer Werte, Text übergeben wird. Nachträglich wird eine Prüfung der Eingabewerte und ggf. eine Konvertierung in dem Skript ergänzt. Zusätzlich werden die Zellen zur Eingabe der Werte in die Ergebnisübersichten formatiert und die Arbeitsblätter geschützt. Häufige Nachfragen zur ausstehenden Rücksendung der Belegkorrektur ergeben sich aufgrund des Hochladens von PDF-Dateien anstatt der EXCEL-Übersichten, durch fehlende Angabe des Namens, Vertauschen des Vor- und Nachnamens und fehlende oder falsche Matrikelnummern, die zur Ermittlung

der E-Mail-Adressen für die Rücksendung erforderlich sind.

Während der Erarbeitung des Skriptes werden eine EXCEL-Datei zur Berechnung von Zwischenergebnissen für den Beleg sowie verschiedene Übungsaufgaben genutzt, um die programmierten Bausteine zu prüfen. Trotz der intensiven Vorbereitung und Kontrolle des Skriptes müssen im Laufe der Zwischenkontrollen Korrekturen an den Berechnungen vorgenommen werden. In den Gesprächen mit einzelnen Studierenden und der Diskussion des Rechenweges konnten Fehler gefunden und in den Skripten korrigiert werden. Die vorgenommenen Korrekturen führten jedoch zum Teil dazu, dass die korrekten Ergebnisse der Vorwoche in der nachfolgenden Korrektur falsch waren. Der Unmut der Studierenden ist mit zusätzlichen Terminen zur Zwischenabgabe zu besänftigen gewesen.

5. Auswertung

Der mit der Korrektur der Ergebnisübersichten verbundene zeitliche Aufwand war im Wintersemester 2022/23 sehr hoch. Mindestens einmal pro Woche war neben der Durchführung der Korrekturen die Anpassung des Skriptes zum Abfangen von falschen Eingaben oder Formatierungsfehlern erforderlich. Hinzu kamen umfangreiche Fragen im Forum, als E-Mail und in persönlichen Gesprächen. Das erarbeitete Skript und die Vorlage kommen seit dem Sommersemester 2023 auch im Fach Maschinenelemente zum Einsatz. Der damit verbundene zeitliche Aufwand hat sich deutlich reduziert.

Im Studienjahr 2023/24 wurde erstmalig die Zwischenabgabe der Ergebnisübersichten über die Moduldauer von zwei Semestern zwischen Anfang November und Ende Mai insgesamt 19-mal angeboten. Die Auswertung der vorliegenden Informationen zu den einzelnen Einreichungen der Studierenden und des jeweils erreichten Fortschritts erfolgte im ersten Schritt händisch. Aufgrund der umfangreichen Daten und der Zielstellung einer kontinuierlichen Auswertung in jedem Semester wurde die Erhebung statistischer Kenngrößen ebenfalls skriptbasiert umgesetzt.

Die Anzahl der Studierenden, die Ihre Ergebnisübersicht abgegeben haben ist in Abb. 4 über den Abgabeterminen aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die ersten elf Möglichkeiten zur Abgabe im WiSe 2023/24 nur von ca. einem Fünftel der Studierenden genutzt wurden. Ab Beginn des Sommersemesters (Balken 12) stieg die Teilnehmendenzahl deutlich bis 3 Wochen vor dem Abgabetermin an und blieb auch bei den letzten beiden Abgabemöglichkeiten auf hohem Niveau.

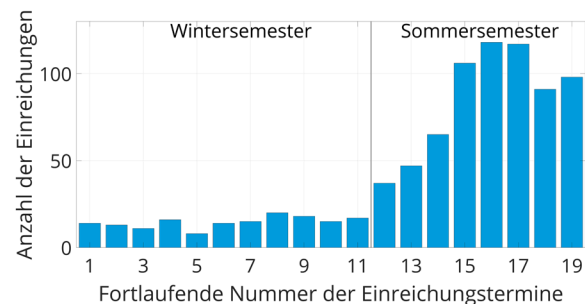


Abb. 4: Anzahl der eingereichten Ergebnisübersichten zu den insgesamt 19 Terminen, eine mehrfache Einreichung war möglich

Insgesamt haben 165 Studierende ihren Beleg abgegeben und mehr als 91 % der Studierenden die Möglichkeit zur Zwischenabgabe mindestens einmal wahrgenommen. Im Durchschnitt haben die Studierenden die Zwischenabgabe 5,1-mal genutzt. Abb. 5 zeigt die Verteilung der Studierenden auf die Anzahl der möglichen Einreichungen und veranschaulicht den sich ergebenden Durchschnitt.

Anhand der Verteilung wird wiederum deutlich, dass ein Großteil der Studierenden erst im Sommersemester mit der Belegbearbeitung begonnen hat und damit maximal acht Einreichungen möglich waren. Nur ca. 8 % der Studierenden nutzte die Möglichkeit zur Einreichung mehr als 9-mal. Dagegen haben 20 % der Studierenden das Angebot weniger als 3-mal in Anspruch genommen. Die zu erkennende Verteilung der Anzahl der Studierenden, aufgetragen über der Häufigkeit der Einreichung, ist interessanterweise mit der Verteilung der Klausurnoten vergleichbar. Im mittleren Notenbereich liegt ansatzweise eine Normalverteilung vor. Die Anzahl der Studierenden, die nicht bestehen ist dagegen überproportional hoch.

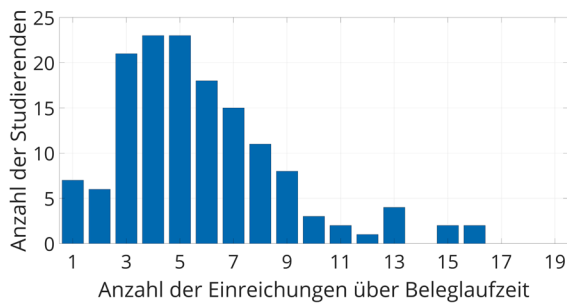


Abb. 5: Anzahl der Studierenden, dargestellt über der Häufigkeit der Nutzung der Zwischenabgaben

Anhand der Verteilung wird wiederum deutlich, dass ein Großteil der Studierenden erst im Sommersemester mit der Belegbearbeitung begonnen hat und damit maximal acht Einreichungen möglich waren. Nur ca. 8 % der Studierenden nutzte die Möglichkeit zur Einreichung mehr als 9-mal. Dagegen haben 20 % der Studierenden das Angebot weniger als 3-mal in Anspruch genommen. Die zu erkennende Verteilung der Anzahl der Studierenden, aufgetragen über der Häufigkeit der Einreichung, ist interessanterweise mit der Verteilung der Klausurnoten vergleichbar. Im mittleren Notenbereich liegt ansatzweise eine Normalverteilung vor. Die Anzahl der Studierenden die nicht bestehen ist dagegen überproportional hoch.

Eine exemplarische Auswertung der erreichten Leistungen in Bezug auf die Anzahl der genutzten Zwischenabgaben für den genannten Zeitraum zeigt (Abb. 6), dass durchschnittlich mindestens zwei Abgaben erforderlich waren, um mindestens 50 % der Punkte zu erreichen und die durchschnittlichen prozentualen Punkte bis zur zehnmaligen Nutzung der Zwischenabgaben nahezu kontinuierlich bis auf 100 % angestiegen sind.

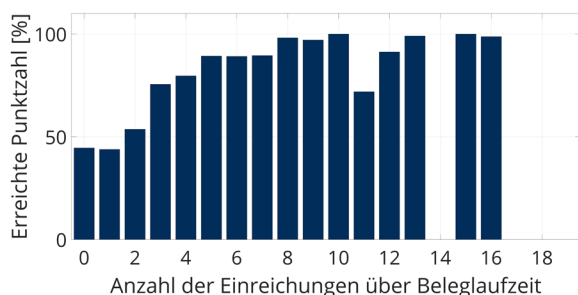


Abb. 6: Ergebnisse der Belegbewertung in Bezug zur Anzahl der eingereichten Zwischenabgaben

Fast 80 % der Studierenden, die bereits im Wintersemester angefangen haben, erreichten 90 % der Punktzahl bei der Berechnung. Nur 40 % der Studierenden erreichten diese Bewertung, wenn Sie erst im Sommersemester angefangen haben. Die Benotung ergibt sich zu gleichen Anteilen aus den korrigierten Berechnungsergebnissen und den Zeichnungen. Aufgrund der geringen Anzahl an Studierenden, die ihre Zwischenergebnisse mehr als 9-mal eingereicht haben, sind die angegebenen Werte für den Punktedurchschnitt nicht repräsentativ. Eine statistische Auswertung im Längsschnitt wird in Zukunft möglich sein.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die angebotene Zwischenkontrolle der Berechnungsergebnisse wird von einem Großteil der Studierenden intensiv genutzt und eröffnet gleichzeitig die Möglichkeit eines besseren Überblicks zum Stand, Fortschritt und zu den Herausforderungen bei der Bearbeitung. Das Vorgehen zur Lösung der Teilaufgaben wird bei Rückmeldung falscher Ergebnisse durch die Studierenden genauer hinterfragt. Dies bietet gute Ansätze sicherzustellen, dass das zu erlernende Wissen gezielter vermittelt werden kann. Nach Fertigstellung des Beleges ist das Interesse an der korrigierten Berechnung oftmals gering und Ursachen für Fehler werden nicht hinterfragt. Durch die Einführung der Zwischenkorrekturen wurde es möglich den Erkenntnisprozess in die Bearbeitungszeit zu verlegen. Durch die Nutzung des Angebotes der Zwischenabgaben können die Studierenden die erreichbare Punktzahl in Berechnungsteil nachweislich verbessern. Die vorliegenden Erkenntnisse und Ergebnisse werden in die Kommunikation mit den Studierenden einfließen und sollen in den Übungen als Anreiz für einen frühzeitigen Bearbeitungsbeginn genutzt werden.