

Zur mathematischen Expertise von Maschinenbauingenieuren – Das Beispiel „Messtechnik“

Burkhard Alpers, Hochschule Aalen, 31.12.2008

1. Einleitung
2. Aufgabenstellung
3. Untersuchungsergebnisse
 - 3.1 Beschreibung der Studenten
 - 3.2 Vorgehensweise, Ergebnisse und Probleme
 - 3.3 Antworten auf die Untersuchungsfragen
4. Resümee und Ausblick
5. Literatur

Anhang:

Aufgabenstellung

Anweisung an Studenten

1. Einleitung

Ziel des Projekts zur „Mathematischen Expertise von Maschinenbauingenieuren“ ist es zu untersuchen, welche Rolle mathematisches Verständnis bei der alltäglichen Arbeit eines Maschinenbauingenieurs spielt. Dazu werden „typische“ Aufgaben in Zusammenarbeit mit einem Anwendungskollegen identifiziert und von zwei Studenten des achten und letzten Semesters bearbeitet. Der Untersuchungsansatz mit seinem Potential und Risiken wurde bereits ausführlich in (Alpers, 2005) dargelegt. Nachdem in den vorhergehenden drei Untersuchungsphasen konstruktive Aufgaben (Vorrichtung bzw. Mechanismus) sowie eine Maschinenelementdimensionierung zu bearbeiten waren, geht es in der im vorliegenden Bericht beschriebenen letzten Projektphase um eine „typische“ Messtechnikaufgabe auf einem real existierenden Lenkungsprüfstand. Die Aufgabenstellung wird im nächsten Abschnitt genauer beschrieben. Abschnitt 3 fasst dann die Untersuchungsergebnisse zusammen. Zunächst werden die Aufgabenbearbeiter mit ihren Ausbildungscharakteristika kurz vorgestellt. Im Gegensatz zu früheren Projektphasen haben die beiden Projektbearbeiter bei dieser Aufgabe zusammengearbeitet, da eine getrennte Messdurchführung zu aufwändig gewesen wäre. Dann werden ausführlich deren Vorgehensweise, die erzielten Ergebnisse und die auftretenden Probleme beschrieben, wobei aber die mathematikrelevanten Aspekte im Vordergrund stehen. Diese Beschreibung liefert die Basis für die Beantwortung der Untersuchungsfragen, die in (Alpers, 2005) erläutert und in Bezug zu existierenden Forschungsarbeiten zur Mathematik am Arbeitsplatz (siehe auch Alpers, 2007) gesetzt werden. Der letzte Abschnitt enthält ein Resümee und den Versuch, vorläufige Schlussfolgerungen für die Mathematikausbildung zu ziehen.

2. Aufgabenstellung

Die genaue Aufgabenstellung ist im Anhang abgedruckt. Es handelt sich um eine „typische“ messtechnische Aufgabe, wie sie im Maschinenbau häufig vorkommt, etwa um Simulationsergebnisse zu überprüfen. Die „reale Basis und Umgebung“ für die Aufgabe bildet der Lenkungsprüfstand, der sich im Maschinenlabor befindet und in Abbildung 1 dargestellt ist. Dort ist der gesamte Lenkungsstrang realisiert, vom Lenkrad über Wellen,

Gelenke, das servounterstützte Lenkgetriebe und die Spurstange hin zu den Rädern. Die Lenkwelle ist bereits mit einer Messvorrichtung für Lenkwinkel und Lenkmoment versehen. Zusätzlich befindet sich noch ein Aufbau auf dem Prüfstand, mit dem reale Lasten etwa durch den Motor mittels Gewichten nachgebildet werden können. Mit dem Prüfstand kann man wie im Kraftfahrzeug über das Lenkrad die Lenkung durchführen und durch entsprechende Einstellung des Servogetriebes eine Pseudogeswindigkeit vorgeben, so dass die der Geschwindigkeit entsprechende Lenkunterstützung geleistet wird. Die Aufgabe bestand nun im Wesentlichen darin, in einer Belastungsanalyse die gefährdeten Komponenten zu bestimmen, für die dort anfallenden Lasten eine geeignete Messung zu ermitteln und durchzuführen und die Ergebnisse zu interpretieren.



Abbildung 1: Lenkungsprüfstand

3. Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden werden zunächst die beiden beteiligten Studenten hinsichtlich ihrer Bildungsherkunft, Erfahrungen und aufgabenrelevanten Tätigkeiten im bisherigen Studienverlauf beschrieben. Der darauf folgende Abschnitt befasst sich mit der grundsätzlichen Vorgehensweise der Studenten bei der Arbeit, den dabei gebildeten oder zugrunde liegenden Modellen und Modellvorstellungen und den Ergebnissen, aber auch den Irrwegen. Der letzte Abschnitt untersucht die Arbeit der Studenten bezüglich der im ersten Bericht dargelegten Untersuchungsfragen, widmet sich also den erforderlichen mathematischen Qualifikationen bei der tatsächlichen oder einer effizienteren Bearbeitung der Aufgabe.

3.1 Beschreibung der Studenten

Beide Studenten befanden sich im Zeitraum der Bearbeitung der Aufgabe im 8. und damit letzten Semester. Sie hatten die Vorlesungen und Prüfungen beendet und noch Zeit bis zum Beginn der Diplomarbeit. Wegen einiger Verfügbarkeitsprobleme zog sich die Arbeit bis in den Beginn der Diplomarbeitsphase hinein. Wie bereits erwähnt, bearbeiteten beide Studenten die Aufgabe gemeinsam, da eine getrennte Erstellung der Messkonfiguration zu aufwändig gewesen wäre.

Studentin A hat zunächst die Realschule und dann das ernährungswissenschaftliche Gymnasium besucht. Sie hat keine Lehre absolviert. Ihr erstes Praxissemester hat sie bei ZF Lenksysteme in Schwäbisch Gmünd verbracht und damit einige praktische Einsichten im Bereich Lenksysteme gewonnen. Dies ermöglichte es ihr bei der Bearbeitung auch hin und wieder, einen Vergleich zu ihren Beobachtungen bei ZF zu ziehen, um die Plausibilität der Ergebnisse zu beurteilen. Das zweite Praxissemester hat sie bei einem Konstruktionsdienstleister absolviert. Sie hat sich in beiden Praxissemestern nicht direkt mit messtechnischen Aufgaben befasst. An der Hochschule hat sie die Vorlesung Messtechnik I und im Rahmen des Schwerpunkts Fahrzeugtechnik auch die Vorlesung über Lenkungssysteme gehört. Eigene Erfahrungen mit der Messtechnik hat sie nicht gesammelt und nur im Rahmen der Messtechnikvorlesung eine Demonstration der Konfigurations- und Auswertesoftware DIAdem erhalten.

Student B hat nach der allgemeinen Hochschulreife zunächst drei Semester an der TU München studiert, bevor er an die HTW Aalen wechselte, da er mit der stark theoretischen Orientierung nicht zurecht gekommen ist. Er hat ebenfalls keine Lehre. Im ersten Praxissemester hat er sich mit dem Aufbau von Lenksäulen beschäftigt und Kenndaten in Excel aufbereitet. Im zweiten Praxissemester bei Bosch Verpackungstechnik war er in der Betriebsmittelkonstruktion tätig. Er verfügt also aus den Praxissemestern über keine messtechnische Erfahrung. Er hat aber im Schwerpunkt „Versuchs- und Messwesen“ die Vorlesung Messtechnik II besucht und in diesem Rahmen auch einmal einen Dehnmessstreifen geklebt. Die weitere Konfiguration und Auswertung wurde jedoch vom Laboringenieur vorgenommen.

Beide Studenten haben also mit der Hochschulreife einen breiteren theoretischen Hintergrund, auch wenn sie in ihrer Grundlagenausbildung eher im studentischen Mittelfeld lagen.

Was die Einschätzung der Mathematiknutzung im Projekt anlangt, so sahen die Studenten bei der Messvorbereitung das Aufstellen des Gleichungsmodells, die Umstellungen und die Formeln in Excel als mathematischen Anteil an. Dafür war ihrer Ansicht nach die Mathematikausbildung an der Hochschule nicht erforderlich, da es sich um Schulstoff handelte. Die Formeln könne man sich im Wesentlichen aus einem Buch oder dem Vorlesungsskript besorgen.

3.2 Vorgehensweise, Ergebnisse und Probleme

Da die beiden Studenten die Aufgabe zusammen bearbeitet haben, gehen wir im Folgenden nicht wie in früheren Projektphasen auf Unterschiede ein, die vom Bildungsgang beeinflusst sein könnten.

Die wesentlichen Schritte bei der Bearbeitung der Aufgabe waren den Bearbeitern aus der Messtechnik-Vorlesung klar und sind auch bei der Aufgabenbeschreibung aufgelistet:

- *Belastungsanalyse des Fahrwerks und Auswahl gefährdeter Komponenten*
- *Bestimmung der Belastungsart*

- *Festlegung einer geeigneten Messkonfiguration*
- *Aufbau und Durchführung der Messung*
- *Auswertung und Vergleich mit bekannten Ergebnissen.*

Diese Aufgabenteile, die mathematischen Gedanken der Studenten bei ihrer Bearbeitung sowie mögliche alternative Denkweisen sollen im Folgenden vorgestellt werden. Die abgebildeten handschriftlichen Aufzeichnungen stammen von den Studenten.

Belastungsanalyse des Fahrwerks und Auswahl gefährdeter Komponenten

Da der Lenkungsprüfstand sich nicht auf einem Rollenprüfstand befindet, kann man nur die Lenkung im Stand und nicht während der Fahrt erfassen. Dies spiegelt etwa die Situation beim Einparken wider und liefert damit eine interessante praktische Lastsituation. „Extreme“ Lasten wie beim Fahren gegen den Randstein werden allerdings nicht erprobt.

Bei der Analyse des Fahrwerks haben die Studenten folgende Komponenten betrachtet:

- Spurstange
- Lenksäule
- Querlenker
- Befestigungen der Lenkung
- Federbein
- Längslenker
- Gehäuse Lenkung
- Felgen

Da die Spurstange den geringsten Querschnitt hat, wurde diese Komponente als die gefährdetste angenommen. Ebenfalls als gefährdet betrachtet wurde die Befestigung der Lenkung (mit Schrauben an Laschen), da hier die Reaktionskräfte aufgenommen werden müssen. Für die weitere Untersuchung wurde die Spurstange ausgewählt, da im Rahmen der im Projekt zur Verfügung stehenden Zeit diese als am einfachsten zu untersuchende betrachtet wurde: Bei den Laschen wäre ein zweiachsiger Spannungszustand zu ermitteln, während man bei der Spurstange mit einem einachsigen auskommt.

Nach Aussage des Anwendungskollegen könnten zwei Situationen Anlass für eine Belastungsuntersuchung sein:

- Bei einer Neukonstruktion muss man für die Auslegung der Komponenten den Kraftfluss durch die Lenkung zumindest überschlagsweise bestimmen; neben einer groben Kraftflussanalyse können auch Simulationsergebnisse Gefährdungspotentiale aufzeigen, die dann messtechnische nachzuweisen sind.
- Im „laufenden Betrieb“ wären hingegen Schadensmeldungen der Grund für eine nähere Untersuchung und in diesem Fall wäre natürlich die gefährdete Komponente unmittelbar gegeben.

Es wäre interessant gewesen, ein Modell für eine Kraftflussanalyse zu sehen, während die Studenten nur ein einfaches „Querschnittskriterium“ verwendet haben.

Bestimmung der Belastungsart

Die weitere Vorgehensweise ist in dem in Abbildung 2 gezeigten Aufschrieb von Student B dargelegt.

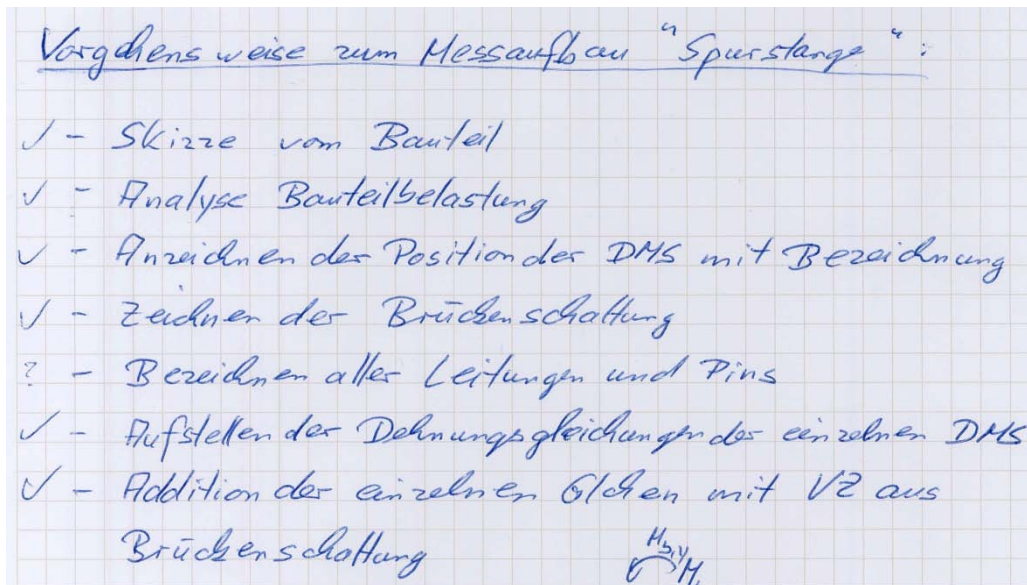


Abbildung 2

Bei der Belastungsart ist, wie es die Studenten in der Vorlesung „Festigkeitslehre“ gelernt haben, zwischen Zug/Druck, Biegung und Torsion zu unterscheiden. Zudem wird der Belastungszustand in ein-, zwei oder dreiachsig unterteilt.

Die Studenten nahmen an, dass zwei Belastungsarten vorliegen, nämlich Zug/Druck und Biegung. Zug/Druckkräfte ergeben sich, wenn die Spurstange zur Lenkung das Rad dreht bzw. zurückdreht. Biegung sollte nach Auskunft des Anwendungskollegen nicht auftreten, da die Spurstange über zwei Kugelgelenke an die Zahnstange bzw. die Felge angekoppelt ist. Nur bei einer Verunreinigung könnten Reibungskräfte in den Kugelgelenken zu einer unerwünschten Biegung führen. Hier hätte eine vorherige Überlegung zu einer deutlichen Zeitersparnis geführt, da die Studenten sich zunächst intensiv Gedanken um die Biegeachse der Biegebelastung gemacht haben, weil man nur bei bekannter Achse die richtige Position zur Messung der maximalen Spannung finden kann.

Laut Aussage des betreuenden Laboringenieurs, eines erfahrenen Messtechnikers, werden bei der Bestimmung der Belastungsart häufig die schwerwiegendsten Fehler gemacht, da durch Messung an unbrauchbaren Stellen auch nur unbrauchbare Ergebnisse erzielt werden. Wenn man die Belastung bereits über eine Simulation näherungsweise kennt, können natürlich auch die diesbezüglichen Ergebnisse zur Festlegung des Messorts verwendet werden.

Wenn sich auch eine Biegebelastung ergeben hätte, hätten die Studenten aus den Krafrichtungen und Kraftansatzpunkten in einem geometrischen Modell die Biegeachse bestimmen müssen.

Im Falle der Spurstange war nur von einem einachsigen Spannungszustand auszugehen, da nur Zug und Druck in Richtung der Spurstange zu betrachten waren.

Festlegung einer geeigneten Messkonfiguration

Ein weit verbreitetes, einfaches Messmittel für Dehnungen, Spannungen und Kräfte sind die so genannten Dehnmessstreifen (DMS), die bereits in der Aufgabenstellung als Messmittel vorgegeben sind. Eine Untersuchung der Eignung unterschiedlicher Messmittel war also nicht Teil der Aufgabe, da auf an der Hochschule verfügbare Mittel zurückzugreifen war.

Das Messen mit DMS beruht darauf, dass die relative (elektrische) Widerstandsänderung eines DMS proportional zur Dehnung ist:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (\text{Formel 1}),$$

wobei k meistens einen Wert um 2 hat (werkstoffabhängig). Die Herleitung des Zusammenhangs (vgl. Ruf (o.J.), Giesecke (1994)) geschieht, indem linearisiert wird, d.h. indem kleine Änderungen durch das totale Differential abgeschätzt werden. Hier muss natürlich dem Benutzer des Modells klar sein, dass dieses nur bei kleinen Dehnungen im elastischen Bereich (im Promille-Bereich) als gute Näherung nutzbar ist. Insofern ist auch die Herleitung des Modells für die Kenntnis der Anwendungsgrenzen wichtig. Alternativ müssten die Anwendungsgrenzen auswendig gelernt werden. Will man das Modell weiterentwickeln für den Fall großer Dehnungen (auch im plastischen Bereich), so muss man natürlich die Herleitung kennen und verstanden haben.

Die DMS wurden vom Laboringenieur zur Verfügung gestellt, so dass die Studenten sich nicht selbst Gedanken über die Charakteristika von DMS gemacht haben. Eine Nachfrage beim Laboringenieur hat ergeben, dass zur Wahl geeigneter DMS die Einsatzumgebung zu betrachten ist (Temperatur, Größe möglicher Klebestellen) sowie eine grobe Belastungsanalyse vorzunehmen ist (Abschätzung der maximalen Dehnung), wobei die Belastungen auch häufig aus einer zu verifizierenden Simulation stammen.

Abbildung 3 zeigt den „Klebeplan“ für die DMS zur Ermittlung der Dehnung bei der Zug/Druckbelastung. Es sollen vier DMS jeweils auf der Ober- bzw. Unterseite der Spurstange (in der Zeichnung als Balken dargestellt, obwohl es sich um ein Rohr handelt) verklebt werden, um durch Biegung oder Temperatur hervorgerufenen Dehnungen herausrechnen zu können.

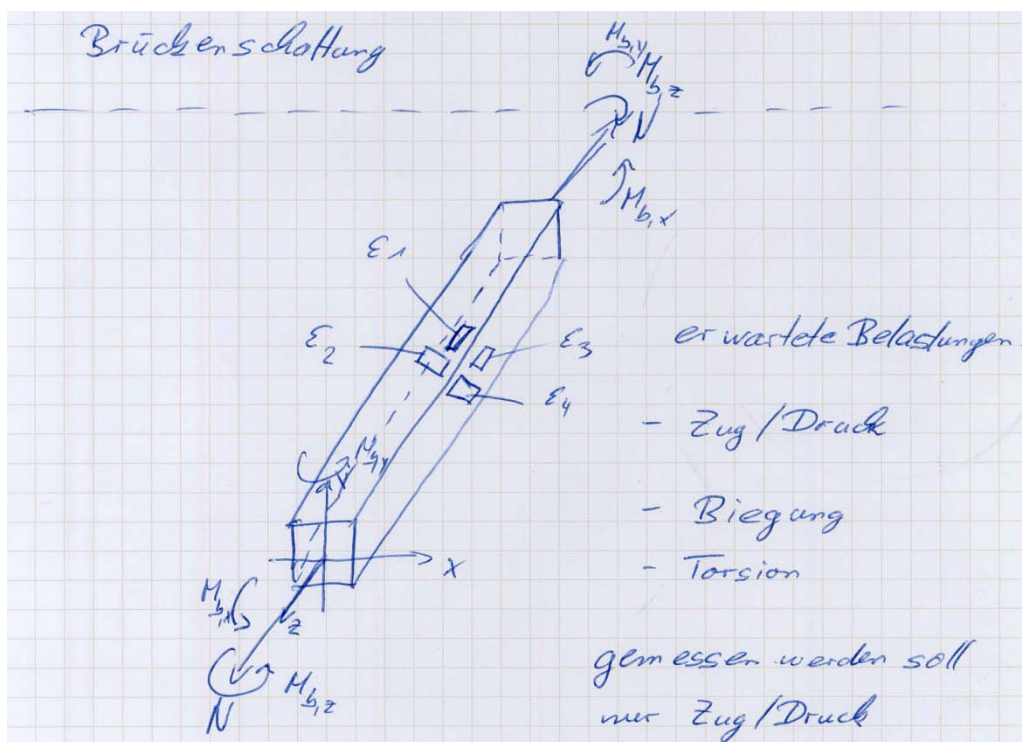


Abbildung 3

Die DMS werden zu einer so genannten Vollbrücke verschaltet (siehe Abbildung 4, der Pfeil bei U_A müsste allerdings umgekehrt gerichtet sein), wie dies in der entsprechenden Literatur und im den Studenten zur Verfügung stehenden Vorlesungsskript dargestellt ist (Wheatstone'sche Brückenschaltung, vgl. (Schrüfer, 2007), (Ruf, o.J.), (Giesecke, 1994)). Neben dem Ausschluss von Temperatur und Biegung liefert die Vollbrücke auch ein gutes Ausgangssignal (im Verhältnis zur Speisespannung). Nimmt man an, dass nur die

Normalspannung vorliegt, so wäre auch eine weniger aufwändige Schaltung mit lediglich einem DMS möglich gewesen.

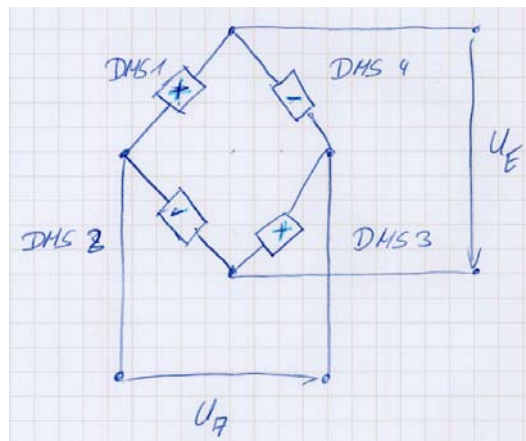


Abbildung 4

Im mathematischen Modell für die Vollbrücke bestimmt man zunächst die Ausgangsspannung U_A in Abhängigkeit der vier Widerstände und ihrer Änderungen nach der Maschenregel. Nimmt man an, dass die ursprünglichen Widerstände alle gleich sind ($=R_0$), so erhält man wiederum nach Linearisierung

$$U_A \approx \frac{U_E}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_0} - \frac{\Delta R_2}{R_0} + \frac{\Delta R_3}{R_0} - \frac{\Delta R_4}{R_0} \right) \quad (\text{Formel 2}).$$

Zusammen mit dem Modell für den Zusammenhang zwischen Widerstandsänderung und Dehnung ergibt sich:

$$\frac{U_A}{U_E} \approx \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (\text{Formel 3}).$$

Um nun die Dehnungen zu bestimmen, benötigt man das einachsige Spannungs- bzw. Dehnungsmodell für die Belastungsarten Zug/Druck und Biegung. Diese Belastungen sind in Abbildung 3 skizziert. Dadurch dass im algebraischen Modell zwei Dehnungen mit positivem Vorzeichen auftreten und zwei mit negativem, kann man durch geschickte Anordnung der DMS in der Vollbrücke gewisse Dehnungen, die man nicht messen möchte, herausrechnen und zudem für die betrachteten Dehnungen noch einen „Verstärkungsfaktor“ erzielen, der die Messgenauigkeit verbessert. Dies zeigt sich in der Bestimmung der Dehnungen durch die Studenten in Abbildung 5 und der daraus sich ergebenden Bestimmung des Dehnungsausdrucks auf der rechten Seite von Formel 3 (s. Abb. 6). Der Index N steht dabei für Normaldehnung (durch Zug/Druck hervorgerufen), der Index b,x für durch Biegung verursachte Dehnung und S für durch Temperaturveränderung erzeugte Dehnung. Die negativen Dehnungen mit dem Vorfaktor μ kommen bei quer geklebten DMS durch die bei Längsdehnung sich ergebende Querkontraktion zustande.

DMS 1:	$\varepsilon_1 = +\varepsilon_N + \varepsilon_{b,x} + \varepsilon_S$
DMS 2:	$\varepsilon_2 = -\mu \cdot \varepsilon_N - \mu \cdot \varepsilon_{b,x} + \varepsilon_S$
DMS 3:	$\varepsilon_3 = +\varepsilon_N - \varepsilon_{b,x} + \varepsilon_S$
DMS 4:	$\varepsilon_4 = -\mu \cdot \varepsilon_N + \mu \cdot \varepsilon_{b,x} + \varepsilon_S$

Abbildung 5

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_M &= \oplus \varepsilon_1 \ominus \varepsilon_2 \oplus \varepsilon_3 \ominus \varepsilon_4 \\
 \varepsilon_M &= \oplus (+\varepsilon_N + \varepsilon_{b,x} + \varepsilon_S) \ominus (-\mu \cdot \varepsilon_N - \mu \cdot \varepsilon_{b,x} + \varepsilon_S) \oplus (\varepsilon_N - \varepsilon_{b,x} + \varepsilon_S) \ominus (-\mu \cdot \varepsilon_N + \mu \cdot \varepsilon_{b,x} + \varepsilon_S) \\
 &= \cancel{\varepsilon_N} + \cancel{\varepsilon_{b,x}} + \cancel{\varepsilon_S} + \mu \cdot \cancel{\varepsilon_N} + \mu \cdot \cancel{\varepsilon_{b,x}} - \cancel{\varepsilon_S} + \cancel{\varepsilon_N} - \cancel{\varepsilon_{b,x}} + \cancel{\varepsilon_S} + \mu \cdot \cancel{\varepsilon_N} - \mu \cdot \cancel{\varepsilon_{b,x}} - \cancel{\varepsilon_S} \\
 \varepsilon_M &= 2 \cdot \varepsilon_N + 2 \cdot \mu \cdot \varepsilon_N \\
 \varepsilon_M &= \underline{\underline{2 \varepsilon_N \cdot (1 + \mu)}}
 \end{aligned}$$

Abbildung 6

Bei der benutzten Schaltung handelt es sich um eine häufig vorkommende Schaltung, die sich bereits in der Literatur ((Schrüfer, 2007), (Giesecke 1994)) bzw. im Skriptum zur Vorlesung (Ruf, o.J.) befindet. Diese kann man natürlich schlicht verwenden, ohne sich weiter um das zugrunde liegende algebraische Modell zu kümmern. Die Modellierung und das geschickte Ausnutzen der unterschiedlichen Vorzeichen werden dann wichtig, wenn man in ähnlicher Weise selbst eine Schaltung erstellen muss, die sich nicht schon aus der Literatur entnehmen lässt. Zwar gibt es nach Auskunft des Messtechnik-Kollegen für Standardsituationen entsprechende Aufbaubeschreibungskataloge von Messtechnik-Anbietern, aber bei der Untersuchung komplizierter Objekte wie z.B. einer Fahrradgabel muss man sich genauer überlegen, welche Dehnungen mit welchen Vorzeichen in das Modell und damit in die Ausgangsspannung eingehen.

In der Modellierung der Studenten passt Abbildung 4 nicht zu Abbildung 5. In der Literatur und im Skript ist die Ausgangsspannung U_A in der umgekehrten Richtung eingezeichnet. Dieser Fehler resultierte später in einem falschen Dehnungsvorzeichen (s.u. die Beschreibung der Messdurchführung).

Bei der vorliegenden einachsigen Aufgabenstellung können die interessierenden Größen wie Dehnung, Kraft und Spannung direkt als proportionale Größen aus dem Verhältnis von Ausgangsspannung und Speisespannung berechnet werden (siehe Abbildung 7). Liegt ein zweiachsiger Spannungszustand vor, so ist mit DMS-Rosetten die Dehnung in drei Richtungen zu messen, woraus dann im mathematischen Modell die Hauptspannungen bzw. Hauptdehnungen und deren Richtungen berechnet werden können (vgl. (Issler u.a., 1997), (Giesecke, 1994)). Nach Auskunft des betreuenden Laboringenieurs werden aber die zugehörigen Berechnungen heutzutage bereits von der Messdatenverarbeitungssoftware vorgenommen. Man muss natürlich nach wie vor eine Vorstellung von der Art des Spannungszustandes haben, um DMS geeignet einzusetzen.

$$\frac{U_D}{U_E} = \frac{K}{4} \cdot (2 \cdot \epsilon_N \cdot (1+\mu))$$

Umstellen nach ϵ_N

$$\epsilon_N \rightarrow \frac{U_D}{U_E} = \frac{K}{4} \cdot (2 \cdot \epsilon_N \cdot (1+\mu))$$

$$\frac{U_D}{U_E} \cdot \frac{4}{K} = 2 \cdot \epsilon_N \cdot (1+\mu)$$

$$\frac{U_D}{U_E} \cdot \frac{4}{K} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1+\mu} = \epsilon_N$$

$$\boxed{\epsilon_N = \frac{U_D}{U_E} \cdot \frac{2}{K \cdot (1+\mu)}}$$

mit bekanntem Querschnitt lässt sich somit die Spannung ^{und die Kraft} im Bauteil berechnen

$$\sigma = E \cdot \epsilon_N$$

$$F = \sigma \cdot A = E \cdot \epsilon_N \cdot A$$

Abbildung 7

Giesecke (1994, S. 54-56) modelliert in der Messkette neben der DMS-Konfiguration auch den Messverstärker und das digitale Voltmeter als Anzeigegerät, um eine geeignete Messauflösung sicherzustellen. Dies ist nach Auskunft des Laboringenieurs nicht mehr nötig, da heutige 24-Bit-Anzeigegeräte jede gewünschte Auflösung anzeigen können.

Aufbau und Durchführung der Messung

Zur Umsetzung der in Abbildung 3 gezeigten DMS-Konfiguration sind die Streifen in Längs- bzw. Querrichtung auf Vorder- und Rückseite der Spurstange anzubringen und zu verlöten. Dies erfordert zum einen eine handwerklich geschickte und saubere Arbeit, zum anderen muss auch bezüglich Anordnung und Verbindung sorgfältig die modellierte Konfiguration realisiert werden. Auf die handwerklichen Probleme der Studenten wird hier nicht weiter eingegangen, da kein Zusammenhang mit der mathematischen Qualifikation besteht. Was die Anordnung anlangt, so hat der Student, der die DMS klebte, eine falsche Verlötung vorgenommen, da er im oberen Abschnitt der Brückenschaltung beide DMS-Gitter in Längsrichtung verlötete. Damit ergab sich statt $\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4$ die Summe $\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_3 - \epsilon_4$, weshalb die Normaldehnungen herausfallen und die Biegedehnungen verbleiben. Der Fehler konnte von den Studenten dadurch entdeckt werden, dass sie die Spurstange vor dem Rückeinbau in den Lenkungsprüfstand per Hand auf Zug/Druck bzw. Biegung belasteten. Da das Messgerät nur minimal auf Zug/Druck reagierte, dafür aber stark auf Biegung, wussten sie, dass die

DMS-Ausrichtung oder Verbindungsstruktur fehlerhaft sein musste, denn sie kannten auch die andere, für die Biegung verwendete Konfiguration. Falls nicht eine so einfache Probe vornehmbar ist, muss die Umsetzung des Modells aus Abbildung 4 sehr sorgfältig erfolgen. Bei Fehlern ist das Modellverständnis sehr hilfreich, um schnell mögliche Fehlerursachen zu erkennen.

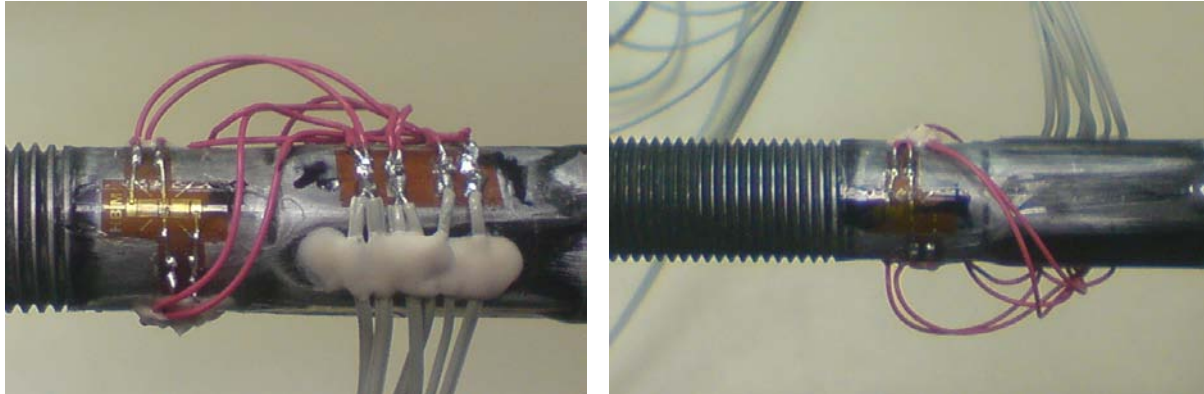


Abbildung 8: Vorderseite und Rückseite

Der Umbau des Messverstärkers wurde durch den Laboringenieur vorgenommen, der die entsprechenden Karten (Module) eingeschoben hat. Es gibt bereits ein Modul, das am Ausgang die Dehnung liefert. An dieses muss die Brücke natürlich korrekt angeschlossen sein, wofür ein Modell der Brücke mit ihren Anschlüssen erforderlich ist. Die Konfiguration des Messverstärkers erfolgt über die Auswertesoftware DIAdem. Für diesen Vorgang ist bereits in der Diplomarbeit (Horch, 2008) eine Vorgehensweise angegeben und es sind auch schon Module für den Messverstärker und für einen Datenspeicher spezifiziert. Mit DIAdem wird in bequemer Weise auf die Konfigurationssoftware des Messverstärkers zugegriffen. An einzugebenden Daten sind zu nennen: (Geiger fragen und vorführen lassen)

- DMS-Widerstand
- Speisespannung
- k-Wert
- Art der Brückenschaltung (hier: Vollbrücke)
- Brückenfaktor (Faktor aus Abbildung 6, letzte Zeile)
- Sonstige Parameter im MGCplus wie z.B. Einheiten ($\mu\text{m}/\text{m}$ für Dehnung)

Man muss also für die Durchführung der Konfigurationsaufgabe das Modell aus Abbildung 4 und die Bedeutung der Konstanten in den Gleichungen kennen. Die Parametereinstellung wurde von den Studenten als sehr zeitaufwändig und auch fehleranfällig angesehen.

Ferner ist anzugeben, welche Eingangskanäle im Speicher gekoppelt werden, um die Daten einander zuordnen zu können, z.B. die Spurstangenkraft einer gewissen Lenkwinkelstellung.

Auswertung und Vergleich mit bekannten Ergebnissen

Bei der ersten Auswertung ergab sich bei der Lenkwinkel-Kraft-Kurve ein „Knödel“ (Studentin A), da der Polygonzug „wüst kreuz und quer“ lief, so dass die Fehlerhaftigkeit leicht erkennbar war. Dies zeigte sich auch, als der Lenkwinkel über der Zeit ausgegeben wurde und bei der Ermittlung von Minimum und Maximum sich ein Minimum von ca. 0° ergab, obwohl dies ca. -600° sein sollten. Eine Überprüfung der Messkonfiguration zeigte, dass ein Parameter (Lenkwinkel in % statt deg) beim MGCplus falsch eingestellt war. Nach der Korrektur ergaben sich Kurven, die in einem groben Check als stimmig angesehen wurden.

Abbildung 9 zeigt inhaltlich den Output von DIAdem (alle folgenden Abbildungen wurden von den Studenten erstellt). Da der Excel-Export wegen des Fehlens einer Datei nicht funktionierte, kopierte Student B die Daten eigenhändig in Excel. Spannung und Kraft wurden in Excel mit den in Abbildung 9 angegebenen einfachen Formeln berechnet. Dann wurden Graphiken erzeugt, indem Lenkwinkel und Lenkmoment, Lenkwinkel und Kraft sowie Lenkwinkel und Spannung als Polygonzug dargestellt wurden. Eigentlich handelt es sich mathematisch um Polygonzugnäherungen für Kurven in Parameterdarstellung, da beide Größen jeweils von der Zeit abhängen. Wegen der Vielzahl an Punkten wirken die Polygonzüge glatt. Der Umlaufsinn ist – von (0,0) aus – im Uhrzeigersinn.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1		Zeit(Takt1)	Lenkwinkel	Lenkmoment	Spurstange Dehnung gemessen	Spurstange Spannung	Spurstange Kraft					
2									E-Modul	210000		
3	MAX	8,995	579,137063	12,7958357	19,5932292	4,11457812	2908,42389					
4	MIN	0	-525,424688	-11,5378151	-56,0174479	-11,7636641	-8315,24413					
5												
6		0	0,012375	-0,0418979	-0,13841146	-0,02906641	-20,5458319		Fläche	706,858347		mit r = 15 mm
7		0,005	0,012375	-0,04153671	-0,03580729	-0,00751953	-5,31524343					
8		0,01	0,012375	-0,03936958	-0,06393229	-0,01342578	-9,49012554					
9		0,015	0,012375	-0,03756364	-0,04934896	-0,01036328	-7,32537185		Formel für Spalte F			$\sigma_{z/d} = \epsilon_N * E$
10		0,02	0,012375	-0,03575769	-0,07877604	-0,01654297	-11,6935355					
11		0,025	0,012375	-0,03395175	-0,05859375	-0,01230469	-8,69767107					
12		0,03	0,012375	-0,03178461	0,05221354	0,01096484	7,75059133		Formel für Spalte G			$F_{z/d} = \sigma_{z/d} * A$
13		0,035	0,012375	-0,02961748	-0,10078125	-0,02116406	-14,9599942					
14		0,04	0,012375	-0,02781154	0,00885417	0,00185937	1,31431474					
15		0,045	0,012375	-0,02672797	-0,03333333	-0,007	-4,94800843					
16		0,05	0,012375	-0,02528322	-0,05104167	-0,01071875	-7,57663791					
17		0,055	0,012375	-0,02347727	-0,05052083	-0,01060937	-7,49932528					
18		0,06	0,012375	-0,02239371	-0,00703125	-0,00147656	-1,04372053		Formel für Zelle J6			$A = \pi * r^2$
19		0,065	0,012375	-0,02094895	-0,13111979	-0,02753516	-19,463455					
20		0,07	0,012375	-0,01842063	-0,09921875	-0,02083594	-14,7280563					
21		0,075	0,012375	-0,01553112	-0,09075521	-0,01905859	-13,4717261					

Abbildung 9

Die Excel-Berechnungen hätten auch in DIAdem vorgenommen werden können; Excel wurde nur verwendet, weil sich Student B dort gut auskennt. Generell gilt DIAdem als Werkzeug für eher anspruchsvollere Datenaufbereitung. Man hätte alternativ auch das einfachere LABview nehmen können, aber der Messaufbau war ja bereits in DIAdem vorhanden.

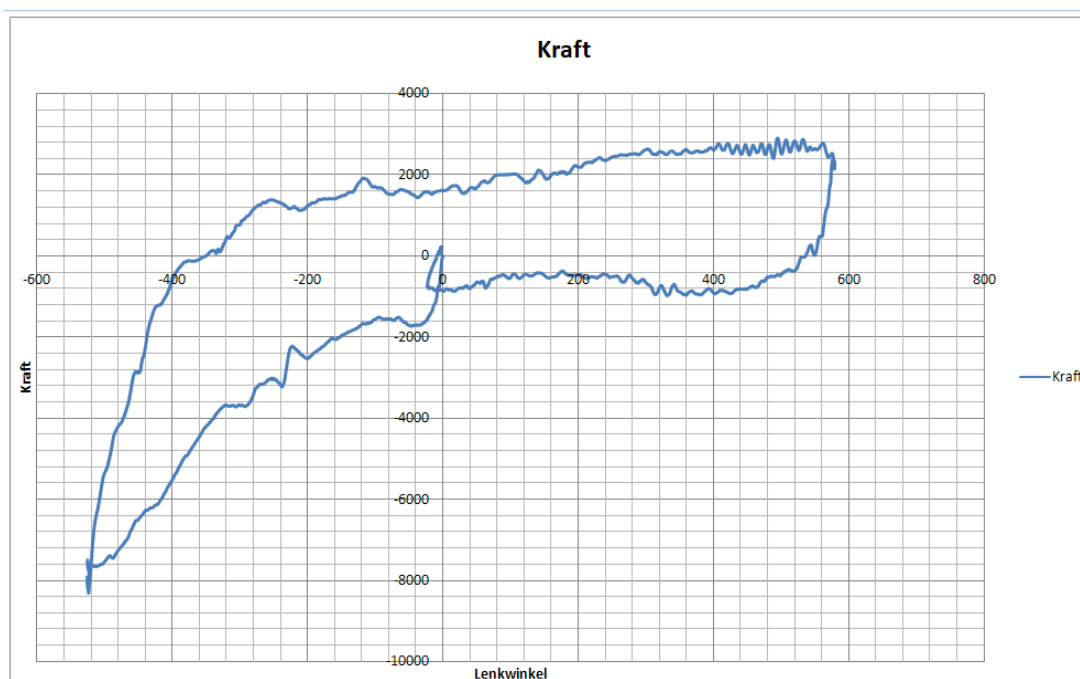


Abbildung 10

Bei der Überprüfung des in Abbildung 10 dargestellten Kraftverlaufs stellte Studentin A fest, dass dieser dem entsprach, an den sie sich aus ihrer Praxissemesterzeit erinnerte. Ein ähnlicher Verlauf ist auch im Skript zur Vorlesung „Fahrzeuglenkung“ (Fauser, o.J., S.42) abgebildet. Da aus der Lenkungsspezifikation bekannt war, dass die Lenkung eine Kraft von maximal 12kN auf die Spurstange ausübt und hier auch nur eine beschränkte maximale Last von 400kg verwendet wurde, ergaben die Werte größenordnungsmäßig Sinn. Die „Unruhen“ in der Kurve sind auf das händische Lenken zurückzuführen. Eine automatische Lenkung ist am Prüfstand auch möglich, das entsprechende Vorgehen war den Studenten aber nicht bekannt. Eine Erklärung für den Verlauf unten links hatten die Studenten nicht. Der Anwendungskollege stellte fest, dass in diesem Bereich gegen die Lenkwinkelbegrenzung gearbeitet werden muss. Bei den Kurven in (Fauser, o.J., S42), findet sich dieser „Ausschlag“ auch wieder.

Die Studenten haben drei Versuchsreihen mit einer Zusatzbelastung von 0 kg, 200 kg bzw. 400 kg durchgeführt, wobei die Versuche ohne Lenkkraftunterstützung und mit Lenkkraftunterstützung bei 10 km/h (Parksituation), 100 km/h (Bundesstrasse) und 200 km/h (Autobahn) erfolgten (siehe Abbildung 11 für die Zusatzbelastung 0 kg). Die Lenkung verringert die Lenkkraftunterstützung bei höherer Geschwindigkeit. Bei der Variation der Unterstützung zeigen sich nur beim Lenkmoment größere Unterschiede, da es für die Kraft an der Spurstange belanglos ist, ob die Kraft von der händischen Lenkung oder vom Lenkgetriebe kommt.

Beim Kraftverlauf in Abbildung 10 (und auch in Abbildung 11) sind dem Verfasser zwei Merkwürdigkeiten aufgefallen, zu denen die Studenten befragt wurden:

- Wird um ca. $+600^\circ$ nach rechts gedreht und dann zurück (Durchlauf der Kurve im Uhrzeigersinn), so ergibt sich bei der Rückdrehung nur eine sehr kleine Zugkraft, die sogar bei der blauen Kurve in Abbildung 11 nahe bei Null liegt. Die Studenten hatten dafür keine Erklärung abgesehen von einer schlechten Ausrichtung der Spur. Studentin A erinnerte sich, dass die Kurven, die sie bei ZF gesehen hatte, in diesem Bereich einen symmetrischen Verlauf aufwiesen. Bei den für Zusatzgewichte aufgenommenen Kurven tritt das Problem, wie Abbildung 12 zeigt, nicht mehr auf. Ein händischer Test am Prüfstand mit dem beteiligten Anwendungskollegen zeigte, dass sich das Rad mit zunehmendem Drehwinkel immer schräger stellt und den Prüfstand auch etwas anhebt. Dreht man dann zurück, und zieht entsprechend an der Spurstange, so wirkt vom Rad aus ein Druck, so dass die Spurstange kaum belastet wird und das Lenken sehr leicht geht. Hier ist also zur geeigneten Interpretation die Kräftebetrachtung am gesamten Prüfstand erforderlich.
- Betrachtet man den Kurvenverlauf in Abbildung 10 im dritten Quadranten, so erkennt man, dass bei der Linksdrehung zunächst die Druckkraft deutlich ansteigt. Lenkt man dann zurück, so könnte man ein sehr schnelles Wechseln von Druckkraft zu Zugkraft (also einen Vorzeichenwechsel) erwarten, da ja das Rad zurückgezogen wird. Nach der Abbildung bleibt aber die Kraft über einem größeren Winkelintervall im Druckkraftbereich. Hierfür hatten die Studenten keine Erklärung. Der händische Versuch mit dem Anwendungskollegen zeigte, dass auch beim Zurücklenken immer noch eine gewisse Druckkraft aufzubringen war, da das Lenkrad sonst über einen kleineren Bereich von selbst zurückgelaufen wäre. Hier spielt wieder die Schrägstellung der Räder eine Rolle. Da die Messung an der (vom Fahrer aus gesehen) linken Spurstange vorgenommen wurde, und die geometrischen Lagen der Stangen bei Linksdrehung und Rechtsdrehung unterschiedlich sind, ist der unterschiedliche Verlauf bei maximaler positiver und negativer Auslenkung nicht verwunderlich.

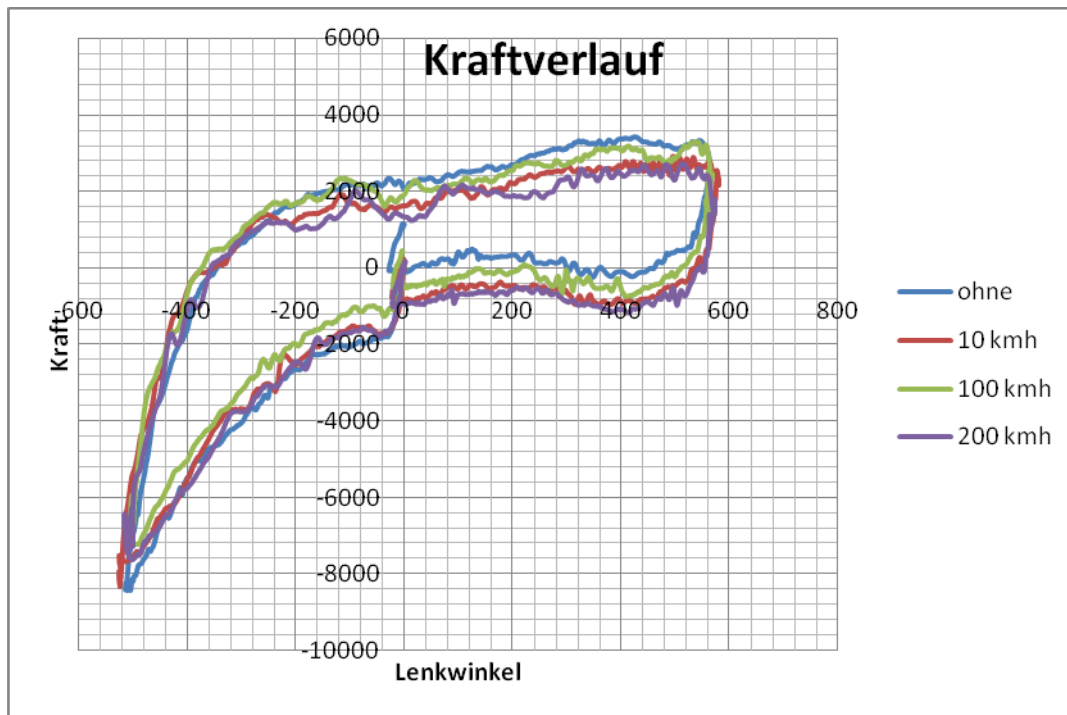


Abbildung 11: Kraftverläufe bei Zusatzbelastung von 0 kg

Die Studenten haben mehrere Versuchsreihen mit unterschiedlichen Zusatzgewichten (0kg, 200kg, 400kg) durchgeführt, um den vermuteten linearen Zusammenhang zwischen Gewicht und sich ergebender Kraft messtechnisch zu bestätigen. Abbildung 12 zeigt die Verläufe, wobei die dicht beieinander liegenden Kurven Verläufe mit demselben Zusatzgewicht bei unterschiedlicher Lenkunterstützung wiedergeben. Es zeigt sich zunächst, dass offenbar ein monotoner Zusammenhang besteht, d.h. mit wachsendem Zusatzgewicht steigt auch die Kraft an. Eine Nachfrage klärte, dass die Studenten diese Monotonie meinten, wenn sie von Linearität sprachen. Will man weiter auf Linearität testen, so stellt sich die Frage, was man bei den verschiedenen Kurven überhaupt miteinander vergleicht. Student B hatte zum Beispiel (ohne genauere Betrachtung der Linearitätsfrage) eine Tabelle mit Maxima und Minima bei den verschiedenen Kurven aufgestellt (Tabelle 1: hier ist offenbar noch ein Fehler enthalten, da die letzte Zeile bei 200kg mit der ersten bei 400kg übereinstimmt). Ein möglicher Linearitätscheck bestünde jetzt darin, die Abstände zwischen den Maxima bzw. Minima zu überprüfen: Sind diese wie bei den Zusatzgewichten annähernd gleich, so würde dies die Linearitätshypothese unterstützen. Man sieht, dass der Abstand zwischen den Werten bei 200kg und 400kg etwas größer ist als derjenige zwischen den Werten bei 0 kg und 200 kg. Man könnte die Betrachtung natürlich auch über einem Teilbereich anstellen, auf dem die Kraft nahezu konstant ist, und dann Mittelwerte vergleichen. Hier wären dann mehrere Versuchsreihen bei gleichen Bedingungen sinnvoll, um den Zufall in den Griff zu bekommen. Die Ausführungen zeigen schon, dass eine lineare Entwicklung bei ganzen Kurven schon nicht mehr so leicht zu untersuchen ist und auch mehrere Wege zulässt.

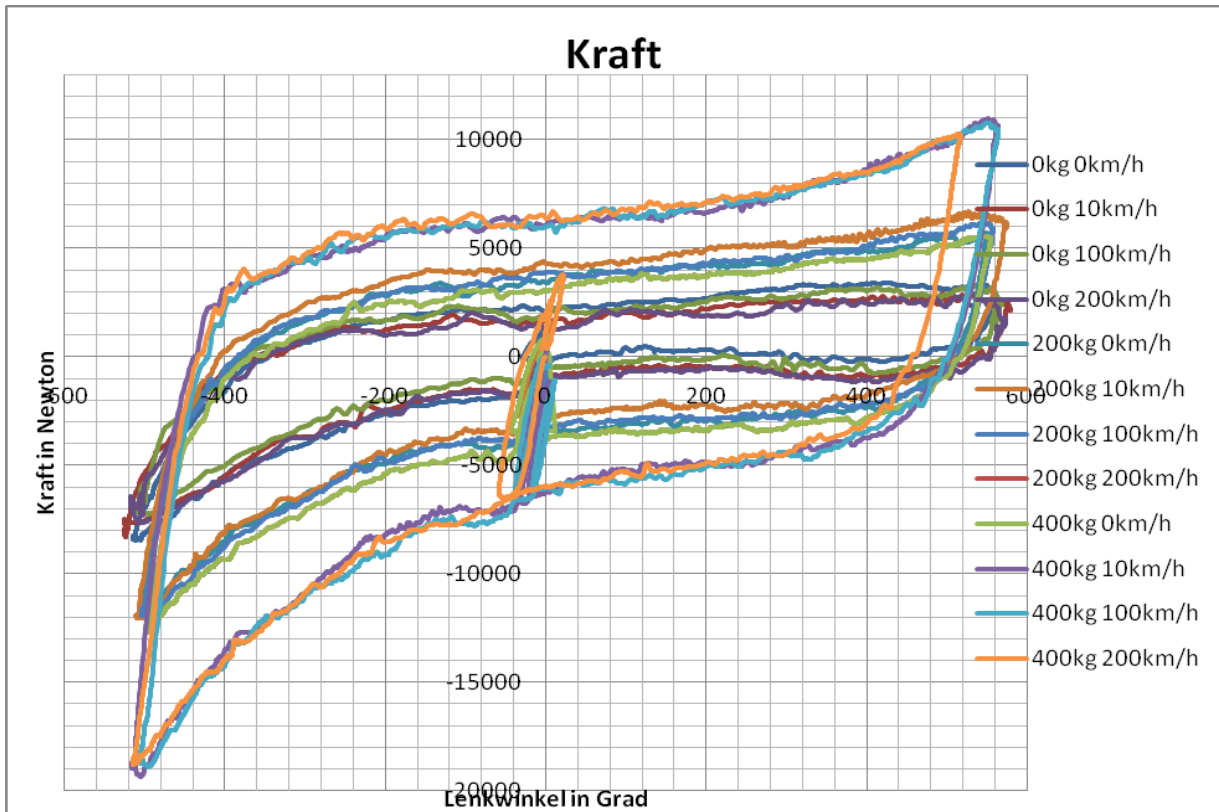


Abbildung 12

Maximal - & Minimalwerte									
Gewicht	Geschwindigkeit	Lenkmoment		Dehnung		Spannung		Kraft	
kg	km/h	Nm		µm		N/mm ²		Newton	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
0	0	-49,69	32,17	-56,90	23,05	-11,95	4,84	-8446,23	3421,93
	10	-11,54	12,80	-56,02	19,59	-11,76	4,11	-8315,24	2908,42
	100	-16,70	16,98	-48,74	22,06	-10,23	4,63	-7234,37	3274,85
	200	-21,06	23,45	-51,39	18,43	-10,79	3,87	-7628,80	2735,32
200	0	-41,23	47,05	-81,07	38,44	-17,02	8,07	-12033,46	5705,77
	10	-12,50	9,55	-81,04	44,93	-17,02	9,43	-12030,33	6668,97
	100	-14,04	15,11	-80,76	41,53	-16,96	8,72	-11988,46	6164,81
	200	-17,46	23,73	-85,45	37,48	-17,94	7,87	-12684,06	5563,90
400	0	-17,46	23,73	-85,45	37,48	-17,94	7,87	-12684,06	5563,90
	10	-12,61	17,63	-130,29	73,92	-27,36	15,52	-19340,59	10972,83
	100	-37,33	41,64	-127,24	72,54	-26,72	15,23	-18888,19	10767,12
	200	-54,37	39,28	-126,69	69,34	-26,60	14,56	-18805,80	10292,32

Tabelle 1

Es blieb die Frage, ob die Spurstange bei der ermittelten Belastung gefährdet ist. Hierzu ist wie üblich die maximal auftretende Spannung mit der für den Werkstoff zulässigen Spannung zu vergleichen. Letztere beträgt bei normalem Stahl (ST37) etwa 180-200 N/mm², so dass ein Blick auf die Spannungswerte in Tabelle 1 sofort zeigt, dass keinerlei Nähe zur Gefährdungsgrenze besteht. Student B sagte, dass er sich erst bei Belastungen von 100-150 N/mm² weitere Gedanken machen würde, und Studentin A fügte hinzu, dass dann eben der Querschnitt der Spurstange um ein „paar Millimeter“ zu vergrößern sei.

3.3 Antworten auf die Untersuchungsfragen

In diesem Abschnitt sollen die im letzten Abschnitt dargelegten Ergebnisse noch einmal hinsichtlich der Untersuchungsfragen beleuchtet werden, um die notwendige mathematische Expertise bei der gegebenen Aufgabenstellung zu verdeutlichen.

- *Welche sichtbaren mathematischen Konzepte und Verfahren werden genutzt und welche Fähigkeiten benötigt man dabei? Unterscheidet sich die Nutzung von der Behandlung in der Mathematikausbildung?*

Mathematische Konzepte und Verfahren treten zunächst einmal bei der algebraischen Modellierung des Zusammenhangs zwischen Dehnung und relativer Widerstandsänderung sowie des Zusammenhangs zwischen dem Verhältnis von Ausgangs- und Speisespannung und der vorzeichenbehafteten relativen Widerstandsänderung in der Brückenschaltung auf. Das Modell, insbesondere die Vorzeichenwahl, muss man verstehen, um gezielt Messbrücken für spezielle Belastungsarten zu erstellen bzw. – wie hier geschehen – Fehler schnell zu erkennen und zu lokalisieren. Bei der Herleitung des Modells werden, da es sich nur um kleine Dehnungen bzw. Widerstandsänderungen handelt, Linearisierungen verwendet. Hier sollte man natürlich wissen, dass der Anwendungsbereich des Modells dementsprechend begrenzt ist. Zudem ist die Herleitung mit der Linearisierung wichtig, wenn man später einmal das Modell erweitern muss, weil auch große Dehnungen im plastischen Bereich gemessen werden sollen.

Eine komplexere Modellierung wäre erforderlich geworden, wenn die Studenten die Zeit gehabt hätten, zusätzlichen an den Laschen den zweiachsigen Spannungszustand zu untersuchen (vgl. (Issler u.a, 1997, S. 32-35), (Giesecke, 1994, S. 81-89)). Nach Aussage des Laboringenieurs würden die entsprechenden Berechnungen jedoch heutzutage auch von der Software erledigt. Man muss aber die Modellvorstellung immer noch nutzen, um überhaupt zu entscheiden, welche DMS-Rosetten man benutzt.

Bei Darstellung und Interpretation der gemessenen Daten handelt es sich mathematisch um einen Datensatz für eine Kurve in Parameterdarstellung, aber dies wurde von den Studenten so nicht wahrgenommen. Um die Daten geeignet interpretieren zu können, muss eine graphische Darstellung erfolgen. Es handelt sich dabei nicht um eine Funktionsdarstellung, da man ja Rückläufigkeit hat. Bei der Interpretation ist insbesondere der Zusammenhang zur Drehbewegung des Lenkrads und zur entsprechenden Bewegung der Räder und des gesamten Prüfstands zu beachten. Um überhaupt Merkwürdigkeiten bzw. interpretationsbedürftige Eigenschaften zu erkennen, sollte man gewisse zu erwartende Kurveneigenschaften wie Symmetrie (zur Lenkwinkelachse bzw. zur Kraftachse) kennen.

Will man schließlich die Kurven für die unterschiedlichen Zusatzlasten (0 kg, 200 kg, 400 kg) vergleichen, so stellt sich die Frage nach dem Vergleichskriterium: Student B hat Maxima und Minima verwendet, aber es wären auch andere Kriterien denkbar. Dann stellt sich natürlich die Frage, wie auf Linearität zu prüfen ist. Die Studenten haben lediglich auf Monotonie geprüft.

- *Wie ist das Zusammenspiel von Intuition, Überschlagsrechnung und präziserer Modellierung, d.h. wo können Vorgehensschritte im von Kent und Noss benannten Spektrum vom qualitativen bis zum quantitativen Denken verortet werden?*

Bei der Betrachtung der gefährdeten Komponenten wurde keine Überschlagsrechnung oder Kräfteflussmodellierung vorgenommen. Stattdessen haben sich die Studenten am Kriterium „Massivität“ der Einzelteile orientiert, wobei die Spurstange optisch als schwächstes Glied

erkannt wurde. Hier spielt also eher eine intuitive qualitative Komponente eine Rolle. Nach Aussage des Anwendungskollegen würde aber bei einer Erstausslegung durchaus auch eine gröbere Kraftflussmodellierung vorgenommen, also eine Überschlagsrechnung im Grobmodell.

Bei der Art der Belastung spielt auch die Erfahrung eine Rolle, da die Studenten versucht haben, die Achse für eine Biegebelastung zu bestimmen, die aber nach Aussage des Anwendungskollegen eigentlich gar nicht auftreten darf. Wäre dies erforderlich gewesen, so hätten die Studenten ein geometrisches Modell mit Kräften und Kraftangriffspunkten erstellen müssen, da nur bei ungefährerer Kenntnis der Biegeachse die DMS so platziert werden können, dass auch die größte Belastung gemessen wird (und nicht etwa ein Nullbelastung auf der so genannten neutralen Faser).

Hat man die Belastungssituation bestimmt, so ist das algebraische Modell mit korrekten Vorzeichen sehr wichtig, um überhaupt die erwünschte Belastung aus der Messung herausfiltern zu können. Zudem muss das Modell verbindungstechnisch auch exakt umgesetzt werden. Die Fehler der Studenten zeigen, dass sich sonst unsinnige Resultate ergeben. In diesem Fall war zwar die Fehlerhaftigkeit leicht zu erkennen, was aber nicht immer so ist.

Bei der Dimensionierung der DMS hilft laut Aussage des Laboringenieurs eine Überschlagsrechnung für die Belastung. Letztere kann sich aber auch aus einer Simulation ergeben.

Bei der Kurveninterpretation ist vor allem qualitatives Denken gefordert, da die groben qualitativen Kurveigenschaften erkannt und in Zusammenhang mit dem Lenkvorgang gebracht werden müssen. Mit genaueren statistischen Modellen zur Betrachtung der linearen Abhängigkeit der Spurstangenkraft von der Gewichtsbelastung wurde hier nicht gearbeitet. Es ist allerdings interessant, dass beim Vergleich von Kurven zunächst einmal ein Vergleichskriterium zu finden ist, das natürlich auch anwendungstechnisch Sinn machen muss.

- *Gibt es verborgene, in Anwendungssituationen eingebettete Mathematik? Welches mathematische Verständnis ist notwendig, um mit den Anwendungssituationen sinnvoll umzugehen? Würde eine bewusste Mathematisierung generell auch im normalen Umgang zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung führen, etwa durch Reduktion des Herumprobierens?*

Die Studenten haben das mathematische Modell für die Vollbrückenschaltung und die DMS-Anordnung explizit aufgeschrieben, so dass man hier nicht von verborgener Mathematik sprechen kann. Aber das Modell ist eng mit der Anwendungssituation „verwoben“: Ein in Längsrichtung geklebter DMS liefert bei Zugbelastung positive Dehnung, ein quer geklebter negative. Bei der Biegesituation ist dies oben genauso, unten aber umgekehrt. Ohne die Mathematisierung im Gleichungsmodell in Abbildung 5 wäre ein schnelles Erkennen der Isolierung einer einzelnen Belastung nur durch Erfahrung möglich und eher fehleranfällig. Das explizite Modell erlaubt auch, es auf neue Situationen anzuwenden.

Eine Mathematisierung ist ferner erforderlich, wenn es um die Modellierung des Einflusses des Zusatzgewichts auf die Spurstangenkraft geht, da es hier noch gar kein sinnvolles Kriterium für den Vergleich zweier Kurven gibt. Hier ist die Mathematisierung wieder eng mit dem Anwendungszusammenhang verknüpft, da sich die Sinnhaftigkeit eines Vergleichskriteriums darin bemisst, welche Anwendungseinsichten es vermittelt.

- *Gibt es Richtlinien oder Konstruktionsregeln, die anstelle einer eigenen Berechnung schlicht angewendet werden?*

Student B ist – nach Abbildung 2 – bei der Analyse und Durchführung so vorgegangen, wie er es in der Messtechnik-Vorlesung und –Übung gelernt hat. Damit war auch die Modellbildung nach Abbildung 4 und 5 im Wesentlichen gegeben.

Bei der Messdurchführung hat er die Anleitung aus (Horch, 2008) benutzt, d.h. er konnte bei der Festlegung der Messkonfiguration in der Software DIAdem bereits auf ein vorgefertigtes Programm zurückgreifen, das noch angepasst werden musste.

- *Kommen tiefere Reflektionen und mathematisches Modellieren zum Einsatz, wenn Problemsituationen („Breakdown“) auftreten, etwa wenn Anforderungen nicht erfüllt sind, Richtlinien nicht einfach anwendbar sind, weitere Optimierung erforderlich ist oder ein Programm in der bisherigen Nutzungsart nicht das erforderliche durchführt? Gab es Probleme bei der Durchführung der Aufgabe, die auf fehlendes oder fehlerhaftes mathematisches Verständnis zurückzuführen sind? Welche Probleme resultieren aus der Unfähigkeit, eigentlich bekannte mathematische Modelle zu entdecken und vorhandenes mathematisches Wissen anzuwenden?*

Die erste Problemsituation bei der Bearbeitung der Aufgabe ergab sich bei der Analyse der Belastung der Spurstange. Die Studenten sind - wenn auch fälschlicherweise – von einer Biegebelastung ausgegangen, konnten aber die Biegeachse nicht bestimmen, was zwingend erforderlich ist, um die DMS an maximal belasteten Stellen anzubringen. Hier wäre eine genauere geometrische Modellierung mit Kraftansatzpunkten und Kraftrichtungen notwendig gewesen, was letztendlich nicht erfolgte, da der Anwendungskollege die Studenten darauf hingewiesen hat, dass keine Biegebelastung vorliegt.

Die zweite Problemsituation trat auf, als die händische Belastungsprobe zeigte, dass das Messsignal auf Biegung, aber nicht auf Zug/Druck regierte. Hier half dem Studenten B sein Modellverständnis und seine Kenntnis über die entsprechende Konfiguration beim Biegesensor, um die Fehlerquelle (falsche Verlötung) schnell zu finden. Beim dann immer noch fehlerhaften Vorzeichen erfolgte die Korrektur durch einfaches Umlöten. Der Fehler in Abbildung 4 (falsche Pfeilrichtung bei U_A) wurde als solcher nicht wahrgenommen. Nach Aussage des Anwendungskollegen kommt es in der Praxis häufig vor, dass zunächst einmal schnell eine Konfiguration erstellt wird und hinterher im Problemfall korrigiert wird. Dies geht natürlich nur dann, wenn fehlerhafte Konfigurationen schnell erkannt werden können. Ansonsten wäre eine sehr sorgfältige Abbildung des Modells äußerst wichtig.

Die Auffälligkeiten im Kurvenverlauf bei den Ergebniskurven (Asymmetrie, anhaltender Druck bei Rückdrehung) wurden von den Studenten gar nicht wahrgenommen. Dies ist nach Ansicht des Verfassers eher auf die spezielle Projektsituation zurückzuführen. Die Studenten sahen ihre Aufgabe im Wesentlichen als erfüllt an und die Kurve entsprach vom groben Verlauf her dem, was sie anderweitig bereits kannten, und die Maximalwerte blieben auch im Rahmen. In der Praxis erfolgt hier sicherlich eine genauere Untersuchung, vor allem, wenn die Messung einen konkreten Schadenshintergrund hat oder wenn man sie für Auslegungszwecke verwenden will.

Zu einer weiteren möglichen Problemsituation, der Identifikation eines Vergleichskriteriums bei den Kurven mit verschiedenen Zusatzgewichten, ist es ebenfalls nicht gekommen, da die Studenten nur die am Kurvenverlauf offensichtliche Monotonie (und nicht die eigentliche Linearitätshypothese) betrachtet haben.

Alle weiteren Problemsituationen waren eher handwerklicher Natur, da das geeignete Anbringen und Verlöten der DMS einige Erfahrung erfordert.

- *Welche kognitiven Modelle sind zur sinnvollen Nutzung der Programme erforderlich? Welche Objekte sind an der Benutzerschnittstelle sichtbar („boundary objects“) und welche mathematische Kompetenz ist für die Nutzung erforderlich oder zumindest hilfreich?*

Die von den Studenten genutzten Programme waren das Messkonfigurations- und auswerteprogramm DIAdem und Excel. Bei der Erstellung der Messkonfiguration in DIAdem scheint das Messbrückenmodell in folgender Weise durch (Konfiguration der Dehnungskarte?)

- k-Faktor
- Art der Brücke

Für die Karte zur Erfassung des Lenkwinkels: Lenkwinkel \leftrightarrow Strichimpuls ?

Ansonsten sind nur die entsprechenden Messkanäle auszulesen und man erhält die Größen in einem gewissen Zeittakt in Tabellenform, wie in Abbildung 9 angegeben.

- *Welche Rolle spielt mathematisches Verständnis bei der Interpretation des Programm-Outputs und der Überprüfung der Sinnhaftigkeit?*

Bei Umsetzung der Ergebnisse in graphische Repräsentation zur besseren Lesbarkeit und damit Interpretierbarkeit muss man wissen, dass als graphische Repräsentation ein Polygonzugmodell geeignet und in Excel verfügbar ist. Weitere statistische Konzepte und deren Umsetzung im Programm waren hier – im Gegensatz zu vielen anderen Messdatenverarbeitungssituationen – nicht erforderlich.

Bei der Interpretation der Kurven war eher Anwendungswissen erforderlich sowie der Vergleich mit aus der Vorlesung, aus Datenblättern oder aus praktischer Erfahrung zur Verfügung stehenden Daten oder Kurven.

- *Welche Rolle spielt das zielorientierte Experimentieren mit Software bei der Lösung von Problemen und beim Erwerb eines Verständnisses für den Einfluß von Modellparametern („understanding through use“ bei Kent und Noss)?*

Da es bei der hier betrachteten Aufgabe nicht um Konstruktion oder Auslegung ging, spielte der experimentelle Aspekt keine Rolle. Bei der Konfiguration mit DIAdem konnte natürlich durch Ändern der Modellparameter gesehen werden, welche Konfiguration richtig ist. Es ist allerdings fraglich, ob sich dadurch ein größeres Verständnis einstellt.

- *Welches Wissen und welche Fähigkeiten sind vor und neben der Programmnutzung erforderlich (Materialkenntnisse, Normteile, Produktionsprozess, Kosten, ...)?*

Zentral in der Messtechnik bei belasteten Bauteilen ist das Erkennen der Belastungssituation. Die Wahl und das Anbringen der Messmittel wie hier der DMS hängen von der korrekten Erkennung der Belastungsart inklusive der zugehörigen Daten (wie Biegeachse) ab. Hier werden nach Angabe des Laboringenieurs die schwersten Fehler innerhalb der Messtechnik begangen, die dann zu unbrauchbaren Ergebnissen führen. Ferner spielt natürlich auch eine Kenntnis der Einsatzbedingungen (z.B. Temperatur, Verschmutzung) eine Rolle. Für das Anbringen und Verlöten der DMS sind entsprechende handwerkliche Fähigkeiten erforderlich.

- *Gibt es generelle mathematische Kompetenzen im Sinne von Wake und Williams (1999) oder Grundvorstellungen und Grundverständnisse im Sinne von Bender (1991) und vom Hofe (1995), die notwendig oder hilfreich bei der Nutzung der Programme sind?*

Im Mittelpunkt der mathematischen Tätigkeit bei der Messtechnikaufgabe steht das Aufstellen und Arbeiten mit dem algebraischen Modell der Vollbrücke und dem Zusammenhang zwischen Ausgangsspannung und Teildehnungen (Abbildungen 5 und 6). Die wesentliche mathematische Kompetenz besteht darin, die Beziehungen zwischen Modell und Anwendung (DMS-Position und Konfiguration) zu erkennen, d.h. das Modell in Anwendungstermini zu interpretieren, um dann die Konfiguration in gewünschter Weise zu erstellen und gegebenenfalls fehlerhafte Konfigurationen zu erkennen und schnell zu korrigieren. Dabei ist insbesondere der Zusammenhang zwischen Vorzeichen im algebraischen Modell und der Lage der DMS von Bedeutung. Im algebraischen Modell muss man erkennen, wie man durch geeignete Vorzeichenwahl diejenige Art von Dehnung isoliert, die man eigentlich messen möchte.

Bei der Betrachtung der Messergebnisse ist als Grundkompetenzen die Umsetzung der tabellarischen Ergebnisse in eine geeignete graphische Repräsentation sowie die Interpretation der letzteren in Anwendungstermini zur Überprüfung der Sinnhaftigkeit zu nennen. Auch ist die Herstellung des Bezugs zu bereits bekannten Daten von Bedeutung, um einen groben Check vorzunehmen.

Bei der Betrachtung des Gewichtseinflusses ist ein Grundverständnis funktionaler Zusammenhänge wichtig, wobei hier sogar die Frage, welche Variable man als abhängige betrachtet, nicht trivial ist.

- *Welche weiteren Berechnungsaufgaben würden an eine spezielle Berechnungsabteilung übergeben und wie sieht die Kommunikationsschnittstelle zu einer solchen Abteilung aus („boundary objects“)?*

Diese Frage stellt sich bei einer Messtechnikaufgabe wie der vorliegenden eher in der anderen Richtung. Nach Auskunft des Laboringenieurs werden in Berechnungsabteilungen häufig Simulationsrechnungen durchgeführt, die dann von Versuchsingenieuren an realen Objekten messtechnisch zu überprüfen sind. Hier sind an der Kommunikationsschnittstelle die Modelle des ein- oder mehrachsigen Spannungszustands zu finden. Der Messtechniker braucht nicht die numerischen Verfahren zu kennen, mit denen die Berechnungsingenieure in ihren Simulationen arbeiten, aber sie müssen das Modell der Belastungsspezifikation (Lagerung, äußere Belastung) und das Lastmodell (Spannungs-, Dehnungszustand oder Kräfte) kennen, da sie beides in der messtechnischen Konfiguration und Ergebnisinterpretation zu berücksichtigen haben.

4. Resümee und Ausblick

In der in diesem Bericht beschriebenen Projektphase sollte die Mathematiknutzung bei einer „typischen“ Messtechnikaufgabe erkundet werden, die von zwei Studenten des achten Semesters bearbeitete wurde. Bezüglich der potentiellen Risiken des Untersuchungsansatzes, die in (Alpers, 2005) diskutiert werden, lässt sich Folgendes feststellen:

- Die Studenten haben sich einige Zeit mit der Frage der Biegebelastung beschäftigt, die sich durch Befragung des Anwendungskollegen in Kürze hätte klären lassen. Das wäre sicherlich bei Einbindung in eine messtechnische Arbeitsgruppe anders verlaufen. Die

Bearbeitung der Aufgabe hat sich – auch wegen Verfügbarkeit des Laboringenieurs – über mehrere Monate hingezogen, was in der Praxis nicht der Fall gewesen wäre. Die beteiligten Studenten hatten mittlerweile bereits schon ihre Diplomarbeit begonnen. So sind die Ergebnisse am Ende nur noch auf grobe Plausibilität geprüft worden.

- Beide Studenten hatten durch den Besuch der entsprechenden Vorlesung das messtechnische Basiswissen zur Durchführung der Aufgabe. Student B hatte auch schon geringe praktische Erfahrung durch Besuch der weiterführenden Messtechnik-Vorlesung. Es ergaben sich allerdings einige handwerkliche Probleme, die dazu führten, dass der Zeitaufwand bei diesem Aufgabenteilbereich deutlich größer als angenommen war und daher auch nur ein Teil (die Spurstange) mit eindimensionalem Spannungszustand behandelt werden konnte. Durch die Betreuung durch den Laboringenieur und durch das vorherige Erstellen und Beschreiben einer ähnlichen Messkonfiguration eines am Prüfstand arbeitenden Diplomanden konnten die Studenten die Messkonfiguration relativ problemlos erstellen. Eine spezielle Schulung war nicht erforderlich.
- Die Studenten haben die Aufgabe von den einzelnen Schritten her so durchgeführt, wie dies auch in der Industrie der Fall wäre. Die Ausgangssituation ist dort aber in der Regel deutlich konkreter, etwa das Ziel der Überprüfung von Simulationsergebnissen oder die Untersuchung konkreter Schadensfälle. Auch was die Ergebnisinterpretation anlangt, ist diese in der Praxis natürlich auf konkrete Ausgangsprobleme zu beziehen und nicht nur – wie hier geschehen – auf Plausibilität und Ähnlichkeit zu bekannten Daten hin zu betrachten. Bei der Konfiguration des Messverstärkers konnten die Studenten auf bereits bestehende Vorlagen zurückgreifen, so dass sich die hierbei erforderlichen Qualifikationen nicht zeigten.
- Was die Repräsentativität der Aufgabe anlangt, so handelt es sich ja um eine Untersuchung eines realen Prüfstandes und nach Auskunft des Laboringenieurs war auch die Aufgabe mit DMS-Nutzung üblich. Absolventen der Fachhochschulen würden für solche Aufgaben eingesetzt. Was die weitere Messdatenverarbeitung anlangt, so war die Aufgabe sicherlich sehr einfach. Sind kompliziertere Signale etwa mit einer Fouriertransformation zu verarbeiten und die Ergebnisse zu interpretieren, so stellen sich deutlich anspruchsvollere Aufgaben.

Die Untersuchungsmethode hat sich trotz der oben beschriebenen Probleme im Ganzen wiederum als sinnvoll erwiesen, da es dem Verfasser durch intensiveres Nachfragen und Demonstration der Toolnutzung direkt am Prüfstand möglich war, das erforderliche mathematische Denken näher zu ergründen. Dafür muss man sich allerdings als Untersuchender schon vorher intensiver mit der Materie beschäftigen, was der Verfasser durch Lektüre der entsprechenden Abschnitte in der messtechnischen Literatur (siehe die Literaturangaben unten) und Befragung der Kollegen sowie des Laboringenieurs geleistet hat. Dies wäre im industriellen Umfeld natürlich sehr viel problematischer, da man dann die Zeitressourcen der Mitarbeiter beanspruchen müsste.

Die Untersuchung hat die folgenden wesentlichen Erkenntnisse bezüglich der Mathematiknutzung und der erforderlichen mathematischen Qualifikationen ergeben:

- Wesentlich für die Bearbeitung der Aufgabenstellung ist das Verständnis des zugrundeliegenden Modells. Dieses wurde in der Messtechnik-Vorlesung hergeleitet und konnte dementsprechend genutzt werden. Man muss dabei genau darauf achten, was man eigentlich erfassen will und wie der Zusammenhang zwischen den durch Belastung hervorgerufenen Dehnungsarten und deren Vorzeichen im Modell ist, um das erwünschte Herausfallen nicht betrachteter Dehnungsarten zu erreichen. Das Modellverständnis mit seiner Herleitung wäre auch wichtig für eine spätere

Anpassung oder Weiterentwicklung. Das Modell selbst ist algebraischer Natur und eher überschaubar.

- Zentral für die Aufstellung einer geeigneten Messkonfiguration ist die richtige Analyse der Belastungssituation, die man messtechnisch erfassen will. Hier werden nach Aussage des Laboringenieurs die meisten und entscheidenden Fehler gemacht. Dafür ist eine gute Kenntnis der entsprechenden Modelle der Festigkeitslehre zum Spannungs- und Dehnungszustand bei verschiedenen Belastungsarten (Zug/Druck, Biegung, Torsion) und verschiedenen Dimensionen wichtig. Hier kann natürlich auch eine gewisse Unsicherheit bestehen, die eventuell dazu führt, dass man mehrere Messstellen auswählt. Auf jeden Fall sollte sich der Bearbeiter einer solchen Aufgabe sich über Unsicherheiten bewusst sein und entsprechend agieren.
- Die Wichtigkeit des Modellverständnisses zeigte sich auch bei der Fehlererkennung und –korrektur. Zwar konnte hier – was nicht immer der Fall ist – händisch eine grobe Probe vorgenommen werden (Belastung der Spurstange auf Zug/Druck bzw. Biegung), aber um aus dem Probenergebnis geeignete Schlüsse zu ziehen, braucht man ein gutes Verständnis der Bedeutung der Vorzeichen im Modell.
- Bei der Nutzung der Hardware und des Konfigurations- und Auswertetools benötigt man ebenfalls ein Modellverständnis, denn dem Anschluss der Drähte liegt ein Modell der Vollbrücke zugrunde und für die Konfiguration des Messverstärkers müssen die entsprechenden Parameter eingegeben werden. Um nicht nur „irgendetwas“ einzugeben, sollte man das algebraische Modell zumindest in seinen „Endformeln“ kennen.
- Bei der Betrachtung des Ergebnisses ging es bei der Messtechnikaufgabe – im Gegensatz zu früheren Aufgaben – nicht um die Verbesserung oder Optimierung eines Bauteils oder Mechanismus, sondern um die Interpretation in Anwendungsbegriffen und die Herstellung des Zusammenhangs zum Fahrwerksverhalten. Dazu muss man interessante Kurveneigenschaften erkennen und das entsprechende Verhalten identifizieren, um das Messergebnis erklären zu können. Da – wie die vorliegende Untersuchung gezeigt hat – auch bei der Messtechnik Fehler passieren können, ist eine Plausibilitätsprüfung erforderlich.
- Bei der vorliegenden Aufgabe war keine größere weitere Datenverarbeitung unter Mathematiknutzung notwendig wie etwa bei der Signalverarbeitung mit Fourieranalyse. Darin liegt sicherlich eine Beschränkung der Aufgabenstellung und man sollte nicht fälschlicherweise davon ausgehen, dass der Messdatenverarbeitungsaspekt bei allen üblichen Messtechnikaufgaben so gering ist. Aber auch bei der hier durchgeführten Aufgabe ergaben sich als interessante Aspekte der Kurvenvergleich und die Ermittlung von „Kennzahlen“ als Vergleichskriterium bei der Untersuchung des Gewichtseinflusses. Um hier ein sinnvolles Kriterium zu finden, ist wiederum die Interpretation der Kurvenverläufe in Anwendungsbegriffen erforderlich.
- Für die Kommunikation mit Berechnungsingenieuren sind gemeinsame Modellvorstellungen für den ein- und mehrachsigen Spannungs- bzw. Dehnungszustand wichtig.

Aus den obigen Erkenntnissen ergeben sich wiederum Konsequenzen für die Lehre. Wie bei der Maschinenelemente-Aufgabe in der Projektphase 2007 hat sich gezeigt, dass das Arbeiten in kleineren algebraischen Modellen eine wesentliche Qualifikation darstellt, die in der Ausbildung trainiert werden sollte. Es ist insbesondere deutlich geworden, dass die Interpretation mathematischer Eigenschaften (wie Vorzeichen bei Summenbestandteilen) in Anwendungskonzepten sehr wichtig für das Aufstellen einer geeigneten Konfiguration und die Fehlerfindung ist. Der Verfasser verfolgt das Training solcher Qualifikationen bereits durch den Einsatz von anwendungsbezogenen Miniprojekten im ersten Ausbildungsjahr. Dabei wird z.B. ein Stabfachwerk einerseits konkret gebaut und vermessen und andererseits in einem Computeralgebraprogramm berechnet, wobei die verschiedenen Fachwerks-

situationen (statisch bestimmt, unter- und überbestimmt) in Zusammenhang gebracht werden mit den algebraischen Eigenschaften des zugrunde liegenden linearen Gleichungssystems. Da die einfachen Modelle aus der Festigkeitslehre, die für das Verständnis der Verwendung von DMS in Brückenschaltungen benötigt werden, auch bereits im ersten Studienjahr bekannt sind, wäre es durchaus sinnvoll, als weiteres Miniprojekt die Modellierung von Brückenschaltungen mit praktischem Versuch durchzuführen.

Mit der vorliegenden Untersuchung wird das Projekt zur „mathematischen Expertise von Maschinenbauingenieuren“ abgeschlossen. In früheren Phasen wurden eine eher statische Konstruktionsaufgabe, eine Mechanismenaufgabe und eine Auslegungsaufgabe für Maschinenelemente bearbeitet. Eine Zusammenfassung aller Ergebnisse soll in einer Publikation für das „European Journal of Engineering Education“ (EJEE) im Jahr 2009 (Einreichung) erfolgen.

5. Literatur

Für die grundlegende Literatur zum Thema „Mathematik am Arbeitsplatz“ sei auf (Alpers, 2005 und 2007) verwiesen.

Alpers, B.: Zur mathematischen Expertise von Maschinenbauingenieuren, Bericht zum LARS-Projekt, Aalen 2005

Alpers, B.: Zur mathematischen Expertise von Maschinenbauingenieuren – Das Beispiel „Auslegung von Maschinenelementen“, Bericht zum LARS-Projekt, Aalen 2007

Fausser, J.: Lenkungstechnik – Hydraulische Lenksysteme, Skriptum zur Vorlesung an der HTW Aalen, o.O., o.J.

Giesecke, P.: Dehnungsmeßstreifentechnik. Grundlagen und Anwendungen in der industriellen Messtechnik, Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 1994

Horch, M.: Konstruktion eines Vorderwagenprüfstandes zur Lenkmomentuntersuchung an Elektrolenkungen mit variabler Achslast, Diplomarbeit HTW Aalen, Aalen 2008

Issler, L., Ruoff, H., Häfele, P.: Festigkeitslehre – Grundlagen, 2. Aufl., Berlin: Springer 1997

Ruf, W.-D.: Messtechnik I, Skriptum zur Vorlesung an der HTW Aalen, o.O., o.J.

Schrüfer, E.: Elektrische Messtechnik, 9. akt. Auflage, München: Hanser Verlag 2007

Weichert, N., Wülker, M.: Messtechnik und Messdatenerfassung, München-Wien: Oldenbourg 2000

Anhang 1: Ausgegebene Aufgabenstellung

Bei der mechanischen Auslegung von Bauteilen oder Komponenten aus dem Maschinen-, Anlagen und Fahrzeugbau dienen bei der Beurteilung der Festigkeit und Steifigkeit die Verschiebungen und Spannungen als Auslegungskriterien.

Spannungen und Verschiebungen können auf verschiedene Arten ermittelt werden. In Versuchen werden diese Größen beispielsweise über Dehnmessstreifen messtechnisch erfasst.

In der vorliegenden Aufgabe sollen an einem Fahrwerk kritische Komponenten untersucht werden. Als Objekt steht ein Prüfstand zur Verfügung, der im Wesentlichen aus einer Vorderachse mit Lenkung, Fahrschemel und Rädern besteht. Lenkmomente können über ein Messlenkrad abgegriffen werden.

Einzelne Teilaufgaben:

- grobe Belastungsanalyse des gesamten Fahrwerks
- Auswahl gefährdeter Komponenten
- Definition des erwarteten Belastungszustandes
- Definition eines geeigneten Messmittels (Dehnmessstreifen)
- Aufbau der Messkette
- Durchführung der Messung
- Auswertung der Messung
- Abgleich der Messergebnisse mit bereits bekannten Strukturgrößen

Anhang 2: Schriftliche Informationen zur Durchführung der Aufgabe an die Bearbeiter durch B. Alpers

Informationen zur Durchführung der Aufgabe

Zeitraumen: ca. 100 Stunden

Arbeitsauftrag: wird vom Kollegen M. gestellt

Durchführung und Dokumentation des Arbeitsprozesses:

Falls sich Fragen bei der Bearbeitung (Randbedingungen, Detaillierungsgrad) ergeben, klären Sie diese bitte mit dem Kollegen M. Dokumentieren Sie bitte ihren Denk- und Arbeitsprozess so, dass er für einen Außenstehenden nachvollziehbar ist. Die Dokumentation sollte folgendes umfassen:

- Detailliertes Aufschreiben aller Überlegungen (Vorgehensweise, Identifikation von Teilaufgaben) und Entscheidungen, insbesondere auch der Probleme und Wege der Problemlösung (mit Alternativen, falls ebenfalls angedacht)
- Genaue Beschreibung der genutzten Ressourcen (Tools, Tabellenbücher, Formelsammlung, sonstige Bücher, Internet-Informationen, Produktbeschreibungen, ...) und der Art der Nutzung, auch Probleme mit der Nutzung
- Aufzeichnung der Problemklärungen mit dem Kollegen M.

Die Aufzeichnungen in der Dokumentation sollen nicht – wie in der Diplomarbeit oder bei den Mathematik III-Projekten – eine nachträglich wohlstrukturierte Form haben, sondern den eigentlichen Arbeitsprozess nachvollziehbar machen. Schreiben Sie also einfach nach jeder Arbeitsphase kurz und ohne Formulierungskunst auf, was Sie gemacht und dabei gedacht haben. Bewahren Sie bitte auch Ihre Notizzettel, Skizzen und Papierrechnungen auf und legen Sie diese zur Dokumentation.

Am Ende der Arbeit möchte ich nach Sichtung der Unterlagen noch einmal den Arbeitsprozess mit Ihnen durchgehen und Sie zu mir unklaren Punkten näher befragen, etwa auch zur genauen Nutzung der Tools wie CAD oder Mechanikprogramm.