

# Methodenvergleich zur Bestimmung des Verlustfaktors von Holzdeckenkonstruktionen

Raphael Völzl<sup>1</sup>, Ulrich Schanda<sup>1</sup>, Simon Mecking<sup>1</sup>, Mathias Kohrmann<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Labor für Schallmesstechnik, Hochschule Rosenheim, schanda@fh-rosenheim.de

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Baumechanik, Technische Universität München

## Einleitung

Berechnungsverfahren zur Prognose des Schwingungsverhaltens von Deckenkonstruktionen und zu schalltechnischen Eigenschaften einzelner Bauteile als auch zusammengesetzter Baukonstruktionen benötigen als Eingangsgröße u.a. die Dämpfung der Systeme, beschrieben i.d.R. durch den Verlustfaktor  $\eta$ . Im Rahmen von zwei Forschungsprojekten an der Hochschule Rosenheim [8, 9] zum vibroakustischen Verhalten von Holzdeckensystemen wurden Übertragungsfunktionen zur Erstellung von Betriebsschwinganalysen messtechnisch ermittelt. Diese Übertragungsfunktionen wurden hinsichtlich des Verlustfaktors verschiedener Deckenkonstruktionen ausgewertet.

## Durchgeführte Messungen

Im Deckenprüfstand der Hochschule Rosenheim (s. Abb. 1) wurden im Rahmen der o.g. Forschungsprojekte Messungen der Transferakzelerenzen vom Anregungspunkt zu insgesamt 144 Punkten je Decke durchgeführt. Die Anregung erfolgte über einen Shaker mittels eines logarithmischen Gleitsinus im Frequenzbereich von  $f_{\min} = 3$  Hz bis  $f_{\max} = 200$  Hz mit einer Dauer von  $T_{\text{Mess}} = 512$  s. Die Messungen sind beschrieben in [8].



Abbildung 1: Deckenprüfstand der Hochschule Rosenheim

## Auswertungsmethoden zur Ermittlung der Verlustfaktoren

Im Rahmen einer Masterarbeit [7] wurde untersucht, welche Methoden dazu geeignet sind, aus den ermittelten Übertragungsfunktionen die Verlustfaktoren der untersuchten Deckensysteme zu bestimmen. Dabei wurden letztlich drei Methoden angewendet, welche im Folgenden näher erläutert werden.

### Power Injection Methode

Die Power Injection Methode [1] wird im vorliegenden Fall terzbandweise angewendet. Zur Bestimmung des Verlustfaktors für das gesamte Deckensystem wird das Verhältnis der am Anregungspunkt eingebrachten Energie  $E_{in}$  pro Schwingungszyklus zur Aufrechterhaltung der Schwingung zu der in der untersuchten Struktur vorhandenen Energie  $E_{vib}$  im eingeschwungenen Zustand des Systems bestimmt. Die eingebrachte Energie ergibt sich aus der anregenden Kraft  $F_{in}$  und der am Anregungspunkt ermittelten Schnelle  $v_{in}$ .

$$E_{in} = \frac{1}{\omega} \cdot \text{Re}(F_{in} \cdot v_{in}^*)$$

Die in der Struktur vorhandene Energie wird bestimmt aus der Summe der Energie an allen einzelnen Messpunkten. Diese ergeben sich aus dem Produkt der dem jeweiligen Messpunkt zugeordneten Masse  $m_i$  und der am Messpunkt ermittelten Schwingschnelle  $v_i$ .

$$E_{vib} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n (m_i \cdot v_i \cdot v_i^*)$$

Aus dem Verhältnis von  $E_{in}$  zu  $E_{vib}$  wird terzbandweise im Frequenzbereich Terzweise der Verlustfaktor  $\eta_{PI}$  der gesamten untersuchten Struktur bestimmt.

$$\eta_{PI} = \frac{E_{in}}{E_{vib}}$$

Die Methode erfordert verhältnismäßig wenig Rechenzeit, lässt jedoch auch keine weiteren statistischen Untersuchungen über die Verteilung der Verlustfaktoren über die Struktur zu. Des Weiteren liegen die Ergebnisse meist etwas höher als die anderer Methoden. Dies kann zum Teil darauf zurückgeführt werden, dass die am Anregungspunkt eingebrachte Energie nicht vollständig nur zur Aufrechterhaltung der Schwingungen in der untersuchten Struktur dient, sondern auch die benachbarten Strukturen des Prüfstandes anregt werden.

### Resonanzbreitenmethode

Die Resonanzbreitenmethode [6] – auch Halbwertsbreitenmethode genannt – lässt sich aus dem Verlauf der Vergrößerungsfunktion eines Einmassenschwingers ableiten. Untersucht wird der spektrale Verlauf der Transferakzeleranz  $H_{af}$ . Aus dem Verhältnis der Resonanzfrequenz  $f_R$  zur Breite der Resonanzüberhöhung  $f_o - f_u$  beim Wert  $H_{af}(f_E)/\sqrt{2}$  kann direkt der Verlustfaktor bestimmt werden (s. Abb. 2 und 3).

$$\eta_{RB} = \frac{f_o - f_u}{f_E}$$

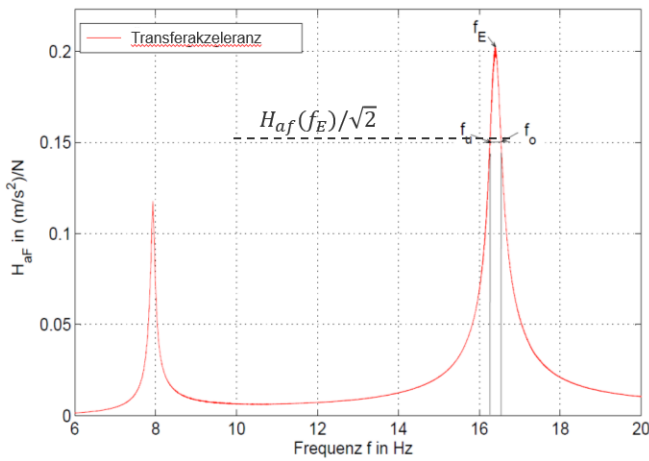


Abbildung 2: Ermittlung der Resonanzbreite aus der Transferakzeleranz

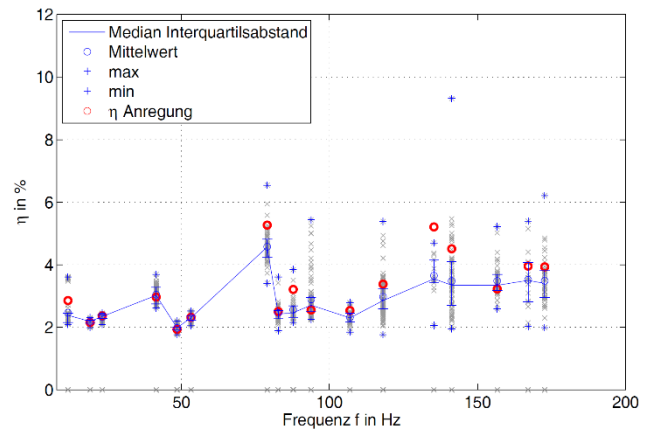


Abbildung 4: Statistische Auswertung der Ergebnisse für  $\eta_{RB}$  über alle 144 Messpunkte und der Anregungsposition

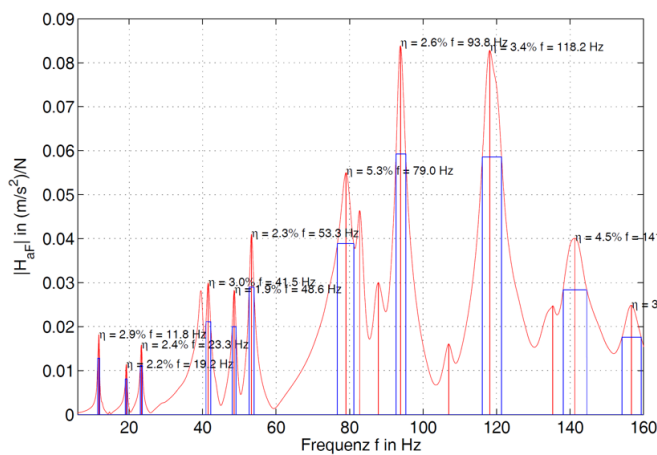


Abbildung 3: Resonanzbreitenmethode am Beispiel der gemessenen Transferakzeleranz einer Brettsper Holzdecke

Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus der Power Injection Methode werden die Verlustfaktoren bei der Resonanzbreitenmethode je Messpunkt und Resonanzüberhöhung ermittelt. Es kann also auch eine statistische Auswertung der untersuchten Messpunkte vorgenommen werden.

Die statistische Auswertung (s. Abb. 4) zeigt eine relativ gute Übereinstimmung der Mittelwerte der Verlustfaktoren mit den an den Anregungspunkten bestimmten Verlustfaktoren. Dies lässt sich auch an anderen untersuchten Systemen erkennen. Es ist also möglich, eine grobe Bewertung der Verlustfaktoren anhand nur des Anregungspunktes zu bestimmen. Voraussetzung ist, dass der Anregungspunkt so gewählt wird, dass auch alle im untersuchten Frequenzbereich vorhandenen Moden angeregt werden.

### Rückwärtsintegration nach Schröder

Zur Durchführung der Rückwärtsintegration nach Schröder [5] werden zunächst die Impulsantworten für jeden Messpunkt durch eine inverse Fourier Transformation der Transferakzeleranzen bestimmt.

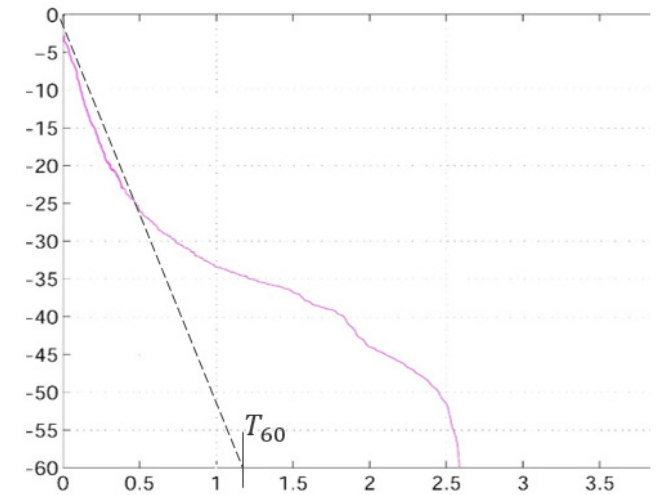


Abbildung 5: Beispiel für Nachhallkurve mit Ausgleichsgeraden zur Bestimmung der Nachhallzeit

Die Impulsantwort wird dann quadriert und vom Ende her bis zum Beginn auf integriert. Wird die dabei erhaltene Kurve mit Bezug auf ihren Wert zum Zeitpunkt  $t = 0$  logarithmisch dargestellt, ergibt sich die sogenannte Nachhallkurve, aus deren Steigung sich die Nachhallzeit  $T_{60}$  bestimmen lässt.

Die Bestimmung der Nachhallzeit wird anhand des ersten linearen Abfalls der Nachhallkurve im Zeitbereich durchgeführt. Dabei werden üblicherweise die Bereiche von - 5 dB zu - 15 dB ( $T_{10}$ ), - 25 dB ( $T_{20}$ ) und - 35 dB ( $T_{30}$ ) ausgewertet. Des Weiteren wird zur Bestimmung der frühen Nachhallzeit EDT (Early Decay Time) der Bereich zwischen 0 dB und - 10 dB ausgewertet. Im Folgenden wurde hierfür eine leicht modifizierte Version EDT\* verwendet, welche im Bereich zwischen -2 dB und -10 dB ermittelt wurde.

Problematisch bei der Rückwärtsintegration ist, dass nach der eigentlichen Impulsantwort bis zum Ende der Messdauer (hier bei  $T_{mess} = 512s$ ) nur noch Rauschen vorhanden ist. Dadurch entsteht ein sogenanntes Rauschplateau, welches den Dynamikumfang der Nachhallkurve stark einschränkt. Die Integrationsdauer muss demzufolge so gewählt werden, dass möglichst nur der Zeitbereich integriert wird, in welchem die Impulsantwort größere Amplituden als das Grundrauschen der Messung hat.

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Rückwärtsintegration mit unterschiedlichen Integrationsdauern dargestellt. Bei zu langen Integrationszeiten ergibt sich ein deutliches Plateau, welches mit längeren Integrationszeiten immer weiter nach oben wandert. Zu kurze Integrationszeiten führen zum Abschneiden der Nachhallkurve, bevor diese das Rauschplateau erreicht hat.

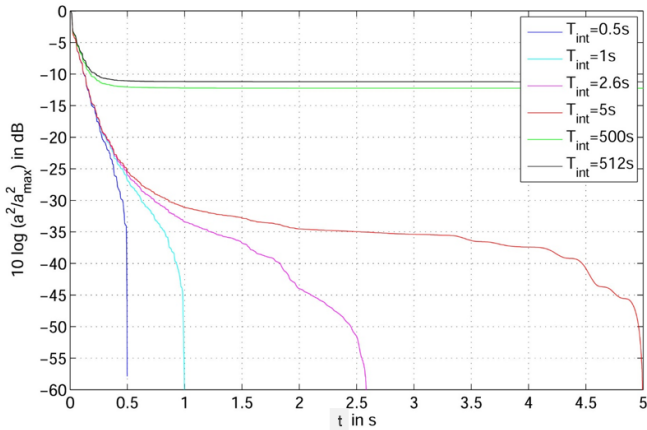


Abbildung 6: Nachhallkurve einer Impulsantwort bei Variation der Integrationszeit

In der Literatur sind verschiedene Methoden zur Ermittlung der Integrationsdauer beschrieben [2, 4]. Diese basieren alle auf einer iterativen Herangehensweise. Da bei den hier beschriebenen Messungen je Messung die Nachhallzeiten an insgesamt 144 Positionen in je 15 Terzen bestimmt werden sollten, würde diese iterative Berechnung auch mit sehr schnellen Rechnern lange Berechnungszeiten zur Folge haben.

Deshalb wird ein Ansatz gewählt, welcher in einem Rechengang die Integrationszeit bestimmt. Die Nachhallkurve wurde wie folgt aus der Impulsantwort ermittelt:

1. Terzfilterung der Impulsantwort im Zeitbereich mittels eines Butterworth-Filters 8-ter Ordnung
2. Quadrieren der gefilterten Impulsantwort
3. Glätten der quadrierten Impulsantwort mittels eines gleitenden Rechteckfensters der Breite  $T_R = \frac{1,5}{f_m \cdot \text{Terz}}$
4. Berechnung des Mittelwertes des Rauschens im Bereich nach dem sicheren Abklingen der Impulsantwort
5. Ermittlung der ersten Unterschreitung des mittleren Rauschens der geglätteten quadrierten Impulsantwort ergibt die Integrationszeit  $T_{int}$  (s. Abb. 6)
6. Rückwärtsintegration der Impulsantwort im Bereich zwischen  $t = T_{int}$  und  $t = 0$  s

$$\int_{T_{int}}^0 ((g(t))^2)_{glatt}$$

ergibt die Nachhallkurve.

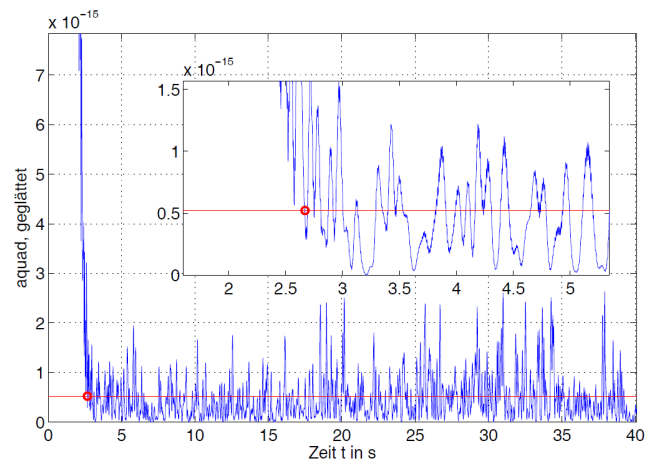


Abbildung 7: Ausschnitt der geglätteten quadrierten Impulsantwort mit dem Mittelwert des Rauschens (rote Linie) und dem Schnittpunkt zwischen Rauschen und Impuls (roter Kreis) zum Zeitpunkt  $T_{int}$

### Ermittlung des Verlustfaktors aus der Körperschall Nachhallzeit

Die Körperschall-Nachhallzeit  $T_{60}$  ist die Zeit, welche vergeht, bis die Impulsantwort des gemessenen Systems am Messpunkt von ihrem Maximum zu Beginn um einen Pegel von 60 dB abgeklungen ist. Die Körperschall-Nachhallzeit wird in Intervallen von Terzen oder Oktaven durch die Rückwärtsintegration nach Schröder bestimmt. Aus dem Wert von  $T_{60}$  und der Terz- bzw. Oktavmittenfrequenz  $f_m$  wird der Verlustfaktor  $\eta_T$  bestimmt.

$$\eta_T = \frac{2,2}{f_m \cdot T_{60}}$$

Die hier im Weiteren dargestellten Verlustfaktoren aus der Körperschall-Nachhallzeit werden terzbandweise ermittelt.

Aus den Nachhallkurven werden für alle Messpunkte und alle Terzen die Nachhallzeiten  $EDT^*$ ,  $T_{10}$  und  $T_{20}$  und daraus die Verlustfaktoren  $\eta_{EDT^*}$ ,  $\eta_{10}$  und  $\eta_{20}$  bestimmt (s. Abb. 8).

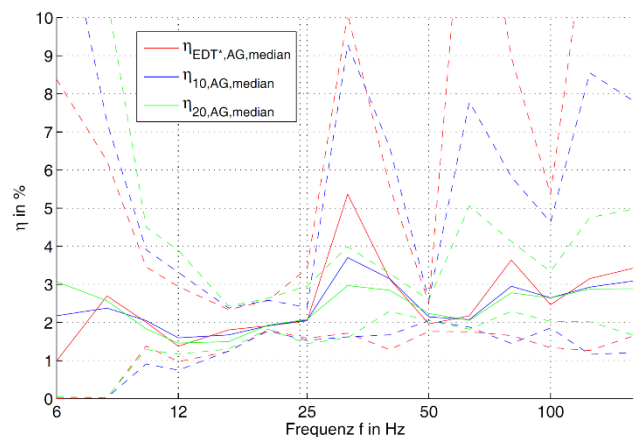
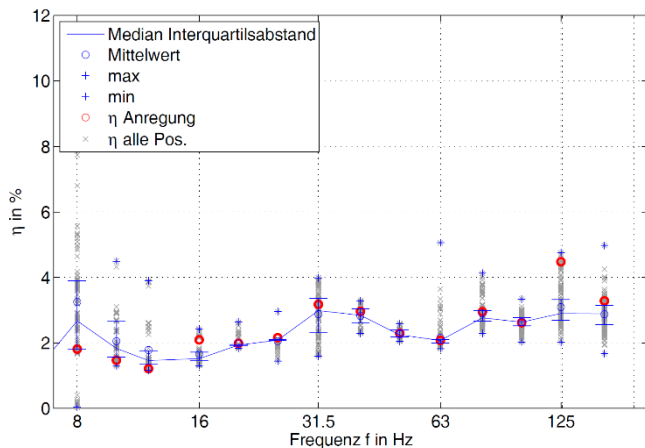


Abbildung 8: Beispielhafte Darstellung der Verlustfaktoren aus der Nachhallzeit für eine Decke aus Brettsperreholzelementen. Dargestellt sind in durchgehenden Linien die Mittelwerte der Verlustfaktoren aller Messpositionen und gestrichelt die Maxima und Minima

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen eine gute Übereinstimmung der Verlustfaktoren aus EDT\* sowie aus  $T_{10}$  und  $T_{20}$ . Auf Grund des teils geringen Dynamikumfangs ist eine Berechnung von  $T_{10}$  und  $T_{20}$  oft nicht möglich.

Die statistische Auswertung (s. Abb. 9) zeigt eine relativ gute Übereinstimmung der Mittelwerte aller gemessenen Positionen mit den am Anregungspunkt ermittelten Verlustfaktoren, wie dies auch bei der Resonanzbreitenmethode beobachtet wurde. Dies lässt sich auch an anderen untersuchten Systemen erkennen.



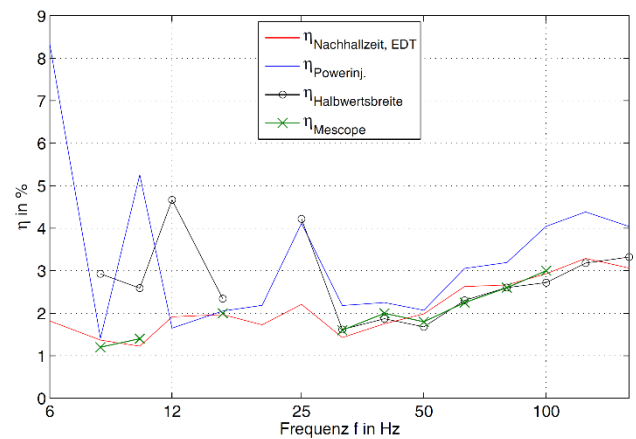
**Abbildung 9:** Statistische Auswertung der Ergebnisse für  $\eta_{EDT^*}$  über alle 144 Messpunkte und der Anregungsposition

## Methodenvergleich

In Abbildung 10 werden die aus den zuvor beschriebenen Methoden ermittelten Verlustfaktoren für unterschiedliche Deckensysteme gegenübergestellt. Dabei werden, sofern vorhanden, zusätzlich auch die Ergebnisse aus der Auswertung der Transferakzeleranzen mit der kommerziellen Software ME'scope hinzugenommen. Letztere Methode basiert auf einem Curve-Fitting der Vergrößerungsfunktion.

Der Vergleich der Methoden zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Es ist zu beobachten, dass die Verlustfaktoren aus der Power Injection Methode meist etwas höhere Werte ergeben. Die Resonanzbreitenmethode ist in Bereichen mit starken Überlappungen der einzelnen Moden schwierig anzuwenden, da sich hier die Resonanzbreite oft nicht eindeutig bestimmen lässt. Sehr gute Auswertungen ermöglicht die Berechnung aus der Körperschall-Nachhallzeit. Diese Methode ist jedoch auch die rechenintensivste.

Für eine statistische Auswertung eignen sich die Methoden der Resonanzbreite und der Körperschall-Nachhallzeit. Mit diesen Methoden lässt sich auch mit geringem Messaufwand eine grobe Näherung der Verlustfaktoren durch Untersuchungen an wenigen Einzelpunkten vornehmen.



**Abbildung 10:** Vergleich der Verlustfaktoren einer untersuchten Brettsper Holzdecke anhand vier unterschiedlicher Auswertemethoden. Die Werte für  $\eta_T$  und  $\eta_{RB}$  sind dabei die Mittelwerte der Verlustfaktoren aller untersuchten Messpunkte.

## Literatur

- [1] Bloss, B.: Measurement of damping in structures by the power input method. *Experimental Techniques* 26 (2002), Nr. 3, S. 30–32
- [2] Karjalainen, P.: Estimation of Modal Decay Parameters from Noisy Response Measurements. *Audio Engineering Society*, 2001
- [3] Mecking, S.: Methodenvergleich zur Bestimmung von Verlustfaktoren von Massivholzelementen. *DAGA*, 2014
- [4] Meier, A.: Die Bedeutung des Verlustfaktors bei der Bestimmung der Schalldämmung im Prüfstand, RWTH Aachen, Dissertation, 2000
- [5] Schroeder, M. R.: New method of measuring reverberation time. In: *J Sound Vib* (1965)
- [6] Zaveri, M.Phil. A.: Modal Analysis of Large Structures - Multiple Exciter Systems, Bruel&Kjaer, 1984. – ISBN 8787355035
- [7] Vörtl R.: Methodenvergleich zur Ermittlung der Verlustfaktoren von Massivholzdeckensystemen aus Akzeleranzmessungen, HS Rosenheim, Masterarbeit 2014
- [8] M. Kohrmann, u.a.: Planungshilfen zur schall- und schwingungstechnischen Beschreibung von Holzdecken. Bericht zum AiF-Forschungsvorhaben *VibWood*, TU-München und HS-Rosenheim, 2014
- [9] Wohlmuth, B., Rank, E., Kollmansberger, S., Schanda, U., Rabold, A., Vibroakustik im Planungsprozess von Holzbauten – Modellierung, numerische Simulation, Validierung, DFG-AiF-Clustervorhaben der Technischen Universität München, Hochschule Rosenheim und ift Rosenheim Abschlussbericht in Bearbeitung, 2015