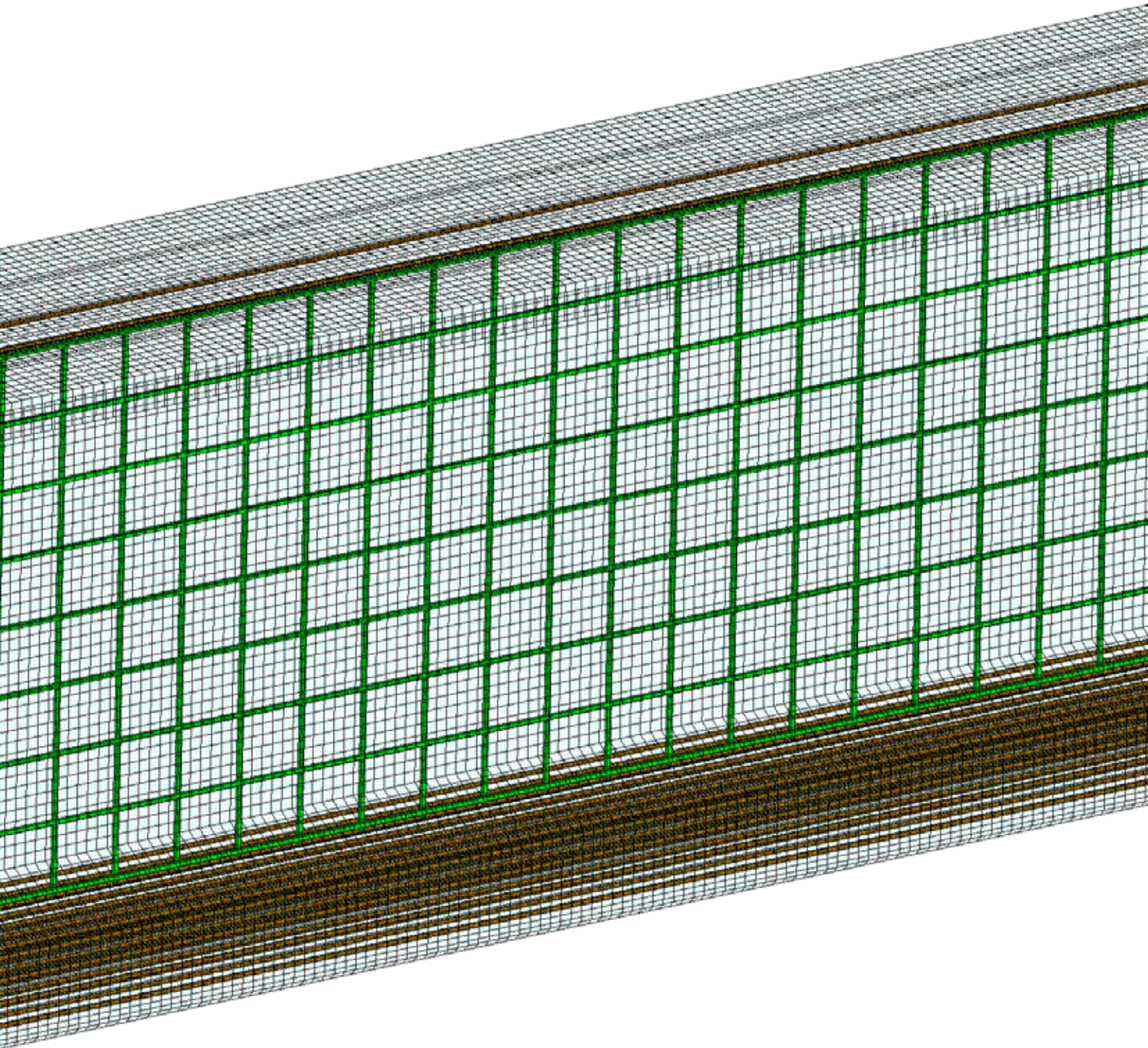




sous l'égide  
de la Fondation de  
Luxembourg

# PRIX D'EXCELLENCE 2016 | 2017







\_Lauréats Prix d'excellence 2016\_

Chères lectrices, chers lecteurs,

Le concept de développement durable - qui repose sur le principe que l'humanité doit tout faire pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de ses ressources ainsi que la protection de l'environnement dans ses processus de développement - conduit à des questions cruciales auxquelles l'humanité devra répondre sur les années et décennies futures.

La Fondation Enovos, créée en 2010, a la vocation et mission d'apporter une contribution importante à ces questions.

En tant que lecteurs avertis de ce 14<sup>ème</sup> Hors-série de la Revue Technique, je n'ai nullement besoin de vous expliquer le facteur déterminant de l'expertise de l'ingénieur dans le domaine évoqués ci-dessus. L'innovation n'y sera en effet pas une réponse parmi d'autres au risque majeur du changement climatique. Elle est à mon sens la seule réponse possible. Car l'innovation n'est pas un outil, mais un esprit qui doit nous guider dans tous les domaines. Et ce sont les ingénieurs qui sont les porteurs de cet esprit et donc du progrès dans ces domaines. Ce seront les ingénieurs, qui seront à la source du développement des solutions recherchées.

C'est la raison pour laquelle j'encourage toute initiative qui donne de la visibilité aux métiers d'ingénieur.

Dans ma double fonction de Président de la Fondation Enovos et de l'Association da Vinci, je suis très content chaque année de pouvoir valoriser les études et carrières professionnelles de l'ingénieur, par ce «Prix d'excellence» de la Fondation Enovos. Ce prix s'inscrit dans la lignée de l'engagement de la Fondation Enovos en faveur du progrès des sciences et des nouvelles technologies permettant d'améliorer la qualité de vie de manière durable.

Ensemble avec l'ANEIL (Association Nationale des Etudiants Ingénieurs Luxembourgeois a.s.b.l.), la Fondation Enovos récompense ainsi chaque année les meilleurs travaux de Master de jeunes ingénieurs avec un prix doté de 2.500€ par lauréat. Dans cette brochure vous découvrirez les travaux de 12 lauréats primés en 2016 et 2017. Vous pourrez juger par vous-même de l'excellence et de l'intérêt de ces travaux. Bonne lecture à tous!

Marc Solvi  
Président de la Fondation Enovos



\_Lauréats Prix d'excellence 2017\_

Les éditions 2016 et 2017 du «Prix d'excellence» émis par la fondation Enovos, sous l'égide de la Fondation de Luxembourg et en collaboration avec l'Association da Vinci ainsi que l'Association Nationale des Etudiants Ingénieurs Luxembourgeois furent à nouveau de grands succès.

Avec 21 dossiers remis en 2017 un nouveau record fut atteint, prouvant ainsi que le «Prix d'excellence» émis par la fondation Enovos gagne en popularité parmi les étudiants.

Une des raisons principales de ce prix est de mettre en évidence le métier d'ingénieur au début du 21ème siècle.

L'industrie, créatrice de nombreux et de divers genres d'emplois a besoin d'ingénieurs pour encadrer et assurer la production ainsi que la gestion de l'entreprise. Les jeunes faisant le choix de leurs études futures connaissent peu les possibilités que le métier de l'ingénieur offre et ne prennent souvent pas en compte cette formation. Les douze travaux de fin d'études présentés dans cet Hors-série de la Revue Technique représentent les aspects très variés de la formation et des tâches dans le monde du travail de l'ingénieur.

Je voudrais remercier mes collègues Mrs. Thierry Flies, Olivier Georges, Laurent Heinen, Philippe Osch ainsi que M. Marc Schiltz du Fonds National de la Recherche pour leur engagement au sein du jury.

Michel Pundel  
Président du jury

# INDEX\_

02_	PREFACE	Marc Solvi, Président de la Fondation Enovos
03_		Michel Pundel, Président du jury
06_	2016	ERMITTLUNG DES POTENTIALS ZUR ENERGIERÜCKGEWINNUNG IN WASSERVERSORGUNGSSYSTEMEN Eric Heinen
14_		BACKWARD ADAPTIVE LINEAR PREDICTIVE CODING WITH NOISE SHAPING Marc Dielissen
18_		UNTERSUCHUNGEN ZUR BESTIMMUNG DES EINFLUSSES AUF DAS VERBUNDVERHALTEN VON TEXTILBETON INFOLGE OBERFLÄCHENMODIFIKATION DER TEXTILEN BEWEHRUNG Tom Steichen, M.Sc. RWTH Aachen
22_		QUERKRAFTTRAGVERHALTEN VON VORGESpanNTEN UHPFRC TRÄGERN MIT UND OHNE QUERKRAFTBEWEHRUNG_ Michel Bichler M.Sc.
24_		REAL ESTATE BUBBLES Gilles Cosyn
26_		EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR BEURTEILUNG DES HYDROABRASIONSVERSCHLEISSES VON BETON AM BEISPIEL EINES WASSERKRAFTWERKS IN VIETNAM Tock Françoise
28_	2017	ENTWICKLUNG EINER BILANZMETHODE ZUR BESTIMMUNG DER EIGENSTROMNUTZUNG AUS PV, WEA UND KWK-ANLAGEN IN NICHTWOHNGBÄUDEN Christophe Armborst
36_		FREQUENZ- UND SENSITIVITÄTSANALYSE AN DEN SEILEN DER STADTHAFENBRÜCKE SASSNITZ Anna Gidt
44_		WEITERENTWICKLUNG VON KOMPONENTEN EINES ELEKTROSTATISCHEN STAUBABSCHEIDERS FÜR BIO MASSEHEIZSYSTEME UNTER NUTZUNG EINER SPEZIELL DAFÜR ANGEPASTEN MESSMETHODIK Dennis Hövelmann
48_		BIM, CONSTRUCTION PLANNING AND SITE OPTIMISATION Dany Pereira Figueiredo
52_		SEISMISCHE AUSLEGUNG UND BEMESSUNG EINES MEHRSTÖCKIGEN GEBÄUDES IN HOLZBAUWEISE IN DER SCHWEIZ Michel Faltz
54_		THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM DURCHSTANZTRAGVERHALTEN PUNKTFÖRMIG GESTÜTZTER PLATTEN Yann Lotzkes



## UNE INITIATIVE DE\_

### HORS SERIES DE LA REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

- #001 Inauguration Forum da Vinci
- #002 40 years of DELPHI in Luxembourg
- #003 100+1 Administration des bâtiments publics
- #004 Ouvrages d'art - ponts - Administration des ponts et chaussées
- #005 Deuxième l'Ecole européenne et Centre polyvalent de l'Enfance
- #006 Concours Construction Belvédère
- #007 Ouvrages d'art routiers + fluviaux - Administration des ponts et chaussées
- #008 Château d'eau - Ville de Luxembourg
- #009 Prix d'excellence 2012 - Fondation de Luxembourg
- #010 Prix d'excellence 2013 - Fondation de Luxembourg
- #011 Bâtiment administratif pour l'Administration de la nature et des forêts
- #012 Prix d'excellence 2014 - 2015 - Fondation de Luxembourg
- #013 Centre d'accueil "Biodiversum"

### REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

[www.revue-technique.lu](http://www.revue-technique.lu)

éditée par

da Vinci a.s.b.l.

ASSOCIATION OF ENGINEERS | ARCHITECTS | SCIENTISTS | INDUSTRIALS

Responsable Revue Technique Sonja Reichert

tel 45 13 54 23 email [s.reichert@revue-technique.lu](mailto:s.reichert@revue-technique.lu)

Graphisme Jan Heinze

Impression 4.000 exemplaires

Lorgé imprimeur s.à r.l.

Zonning Industriel, 12-6

L-8287 KEHLEN (GDL)

revue imprimée sur du papier\_



ISSN: 2418-4586



Prix d'excellence 2016 mention excellent

# ERMITTLUNG DES POTENTIALS ZUR ENERGIERÜCKGEWINNUNG IN WASSERVERSORGUNGSSYSTEMEN\_

Eric Heinen

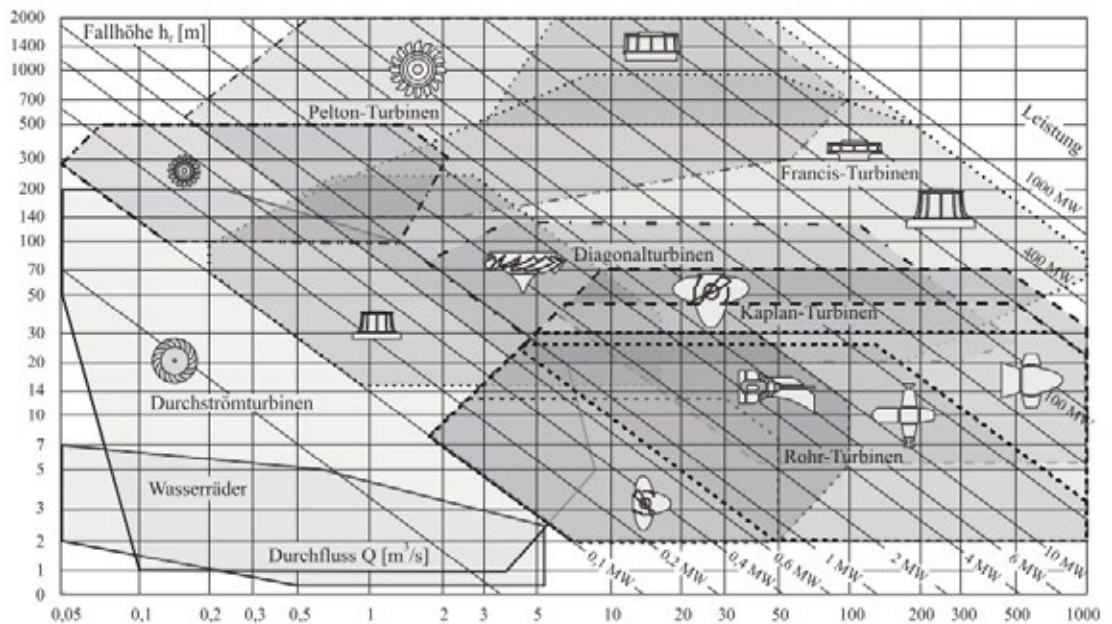


Abb. 1: Einsatzbereiche unterschiedlicher hydraulischen Maschinen zur Energieerzeugung in Abhängigkeit der Fallhöhe  $h$  und des Durchflusses  $Q$  (Giesecke u. a., 2014)

In diesem Artikel, basierend auf meiner Masterarbeit (Heinen, 2016), wird die Herleitung einer Methodik, welche das Potential zur Energierückgewinnung in Trinkwasserversorgungsnetzen, durch den Einsatz von radial durchströmten Pumpen als Turbinen (PAT) und Turbinen, beschrieben. Die Betriebsweise einer PAT mit den dazu gehörigen Betriebsselementen an den Standorten von Druckmindern und Behälterzuläufen ist dabei zu betrachten. Spezifisch in diesem Artikel wird die Betriebsweise auf der Kennlinie, bei einer konstanten Drehzahl, hervorgehoben. Durch die Ermittlung der jeweiligen Potentiale und der einzusetzenden Technik wird eine Schnittstelle zur Kostenvergleichsanalyse gegeben.

## Strömungsmaschinen

Das Medium Wasser zur Gewinnung von Energie zu nutzen, wird in vielen Bereichen umgesetzt. Dabei wird größtenteils die Eigenschaft, potentielle in kinetische Energie umzuwandeln, zu Nutze gemacht. Für verschiedene Einsatzgebiete in der Wasserkraftgewinnung kann man von einfachen Wasserrädern bis zu komplexen

Strömungsmaschinen Gebrauch machen. Dabei sind jeweils die Randbedingungen, sowie die Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Wasserkraftanlagen werden nach dem Gefälle unterschieden (Lang und Vaas, 2014, S.74):

- \_Niederdruckanlagen  $H < 15\text{m}$
- \_Mitteldruckanlagen  $H = 15\text{-}50\text{m}$
- \_Hochdruckanlagen  $H > 50\text{m}$

Aus der Abbildung 1 ist ersichtlich, dass für unterschiedliche Einsatzbereiche, welche die Fallhöhe und den Durchfluss betreffen, eine spezifische Strömungsmaschine erforderlich ist. Durch die Änderung der Laufradform,

- \_Radialräder
- \_Halbaxialräder
- \_Axialräder

werden die verschiedenen Einsatzbereiche ermöglicht. Zudem können durch weitere Geometrieänderungen die Einsatzbereiche variiert werden. In der Wasserkraft gibt es zwei verschiedene betrieblich zu unterscheidende Turbinenarten:

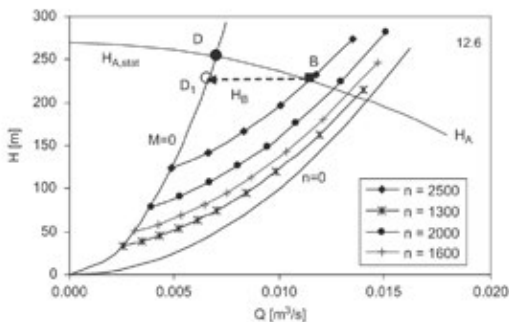


Abb. 2: Turbinenkennlinien (PAT), mit radialen Laufrädern, bei verschiedenen Drehzahlen n, Leerlaufkennlinie M=0, Widerstandkennlinie n=0 und Anlagenkennlinie H<sub>A</sub>. (Gülich, 2014)

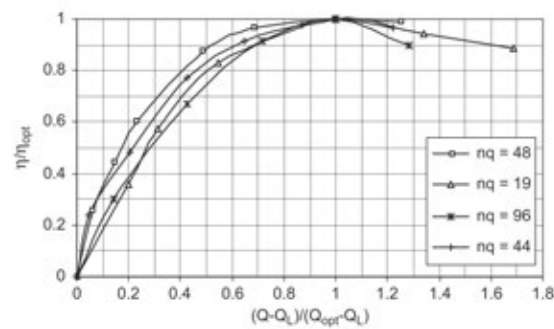


Abb. 3: Verlauf des Turbinenwirkungsgrades über dem Volumenstrom. Mit Leerlaufvolumenstrom Q<sub>L</sub>, optimalen Volumenstrom Q<sub>opt</sub> und der jeweiligen spezifischen Drehzahl n<sub>q</sub> (Gülich, 2014)

- \_Aktionsturbinen (Gleichdruckturbinen)
- \_Reaktionsturbinen (Überdruckturbinen)

Bei Aktionsturbinen (Pelton-, Freistrahlturbinen, ...) wird die potentielle Energie am Turbineneintritt in kinetische Energie umgewandelt. Ein Freistrah tritt unter Atmosphärendruck auf das Laufrad, welches dem Strahl die Energie entzieht und so ein Abströmen mit minimaler Energie gegeben ist. Diese Art von Turbine darf nicht im Wasser waten, da sonst ihre Funktionsweise beeinträchtigt ist. Bei Reaktionsturbinen (Kaplan-, Francisturbinen, ...) kann beidseitig eine Druckhöhe anstehen. Die Druckdifferenz und der Durchfluss werden ausgenutzt und in kinetische Energie umgesetzt. Die hydraulische Leistung, welche vom Wasser zur Verfügung gestellt wird lässt sich mit der folgenden Formel berechnen:

$$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Diese verfügbare Energie ist wegen Energieverlusten, welche in der Strömungsmaschine  $\eta_T$ , des Getriebes  $\eta_{Getriebe}$ , des Generators  $\eta_G$ , der Frequenzumrichter  $\eta_F$ , und der Umspannanlage  $\eta_{Trrafo}$  entstehen nicht voll nutzbar. Aus der Multiplikation aller Wirkungsgradkoeffizienten, ergibt sich der Gesamtwirkungsgrad  $\eta_{tot}$ . Die elektrische Leistung, welche man erzeugen kann und welche man ins Netz einspeisen kann wird mit der folgenden Gleichung ausgedrückt:

$$P_{Netz} = \eta_{tot} \cdot P_{hyd}$$

**Wasserversorgungssysteme**

In Wasserversorgungssystemen werden durch Energiedissipation anstehende Drücke abgebaut. Ziel ist es, an definierten Standorten das anstehende Potential zur Energierückgewinnung zu ermitteln. Dafür erfolgt eine Typisierung möglicher Standorte zur Energierückgewinnung und hinsichtlich notwendiger Randbedingungen wird eine Umsetzung ermöglicht. Die nachfolgende Methodik soll somit mögliche Standorte identifizieren, die technische Umsetzbarkeit ersichtlich machen und ein Werkzeug für ein Kosten/Nutzen Vergleich geben.

Anhand der Zielsetzung wird ein Ansatz hergeleitet, welcher bei verschiedenen Betriebsweisen und den Einbaustandorten Wasserbehälter und Druckminderer, das jeweilige Energiepotential, für repräsentative Zeiträume, ermittelt. Die Betriebselemente sind für die jeweilige Betriebsweise zu definieren. Standorte werden mit verschiedenen Randbedingungen betrachtet und ein jeweiliges Verfahren für die Ermittlung des Energiepotentials gegeben. Mögliche Standorte können somit identifiziert werden und auf ihre Machbarkeit überprüft werden. Das Ziel liegt darin einen Ansatz zu liefern, welcher eine Schnittstelle für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung gibt.

**PAT's und Turbinen**

Zur Energiegewinnung in Trinkwasserkraftwerken, werden häufig Turbinen oder Pumpen als Turbinen mit radialen Laufrädern (PAT) eingesetzt. In der Trinkwasserversorgung werden in der Regel für Aktionsturbinen PAT's oder Überdruck-Peltonsturbinen genutzt. Bei Reaktionsturbinen

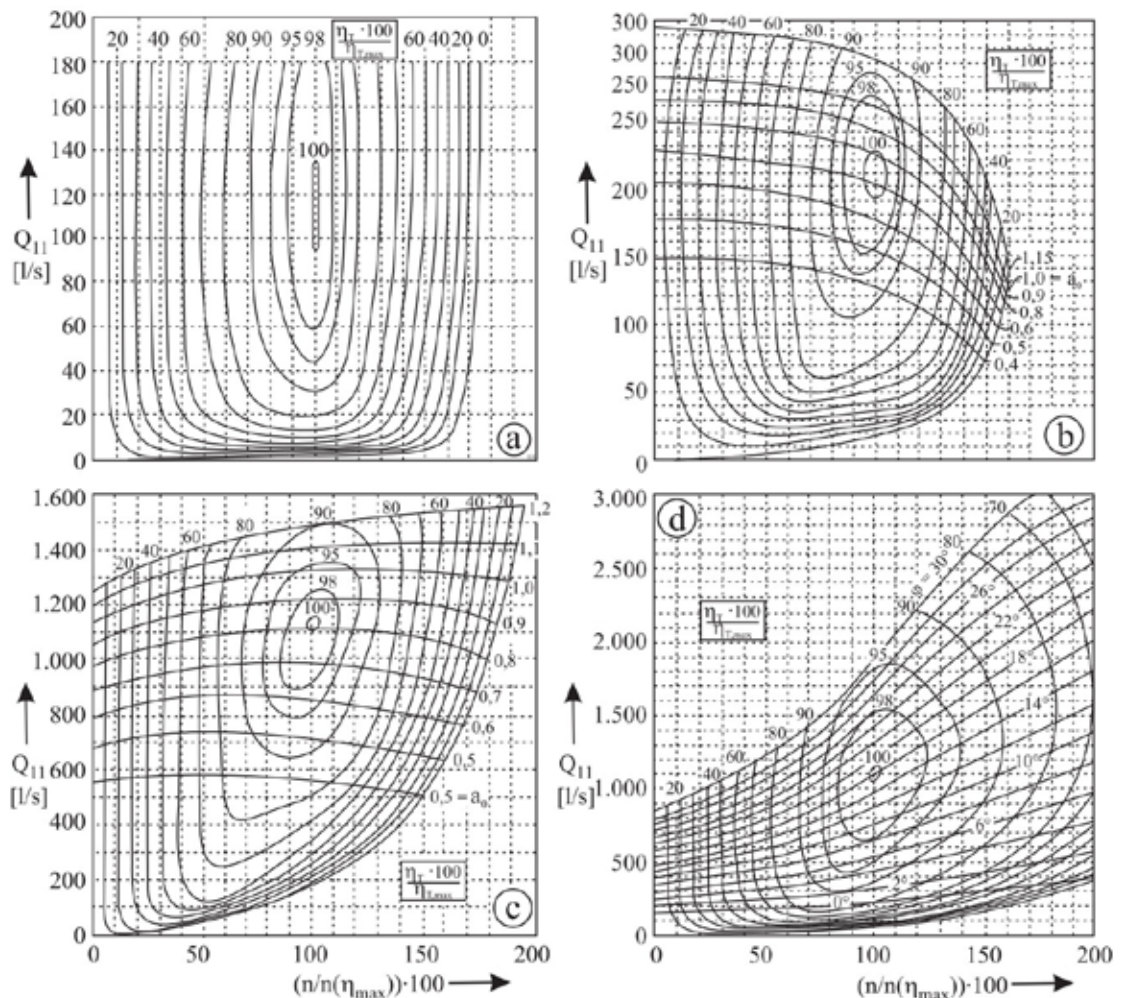


Abb. 4: Muscheldiagramme: a) Peltonturbine  $n \cdot q = 16, 3 \text{ min}^{-1}$ ; b) Francis-Langsam-läufers  $q = 23 \text{ min}^{-1}$ ; c) Francis-Schnellläufer  $n \cdot q 90 \text{ min}^{-1}$ ; d) Kaplan-Turbine  $n \cdot q = 160 \text{ min}^{-1}$  (Giesecke u. a., 2014)

werden meistens Pelton- und Durchströmturbinen in Betracht gezogen. Es muss jedoch nach Art der Anwendung und Wirtschaftlichkeit unterschieden werden, welche Bauart man für den jeweiligen Einsatz verwendet. Anwendungsbeispiele findet man in Literaturwerken wie in Burger und Andermatt (1997) und in Kilchmann und Müller (2004). Eine Erhöhung der Flexibilität von Strömungsmaschinen kann mit Parallel- oder Serienschaltung einzelner Betriebselemente erreicht werden.

PAT's werden aus einer Auswahl bestehender Serienpumpen ausgewählt und nicht spezifisch für eine Anlage entwickelt, besitzen im Regelfall keine verstellbaren Lauf- und Leitschaufeln und haben somit keine Möglichkeit einen veränderten Volumenstrom mit gleicher Drehzahl aufzunehmen. Die Wirkungsgrad-Kennlinien von PAT's, nehmen im Vergleich mit denen von Turbinen, von ihrem optimalen Betriebspunkt, schnell ab.

Liegt eine konstante Drehzahl vor, so kann die PAT nur auf ihrer Kennlinie mit der spezifischen Drehzahl betrieben werden. Zudem wird der Einsatzbereich der PAT durch die Leerlaufkennlinie und Widerstandkennlinie, welche auch noch Festbremskennlinie genannt wird, begrenzt. Laut Rösler (2015) stellt die Festbremskennlinie die Verlustkurve des mechanisch fest gebremsten Laufrades dar. Des Weiteren erläutert Rösler (2015), dass an der Leerlaufkennlinie die jeweiligen Betriebskennlinien in den Bereich, in dem Leistung erzeugt wird, starten. Auf der anderen Seite der Leerlaufkennlinie könnten die Betriebskennlinien weitergeführt werden, dort aber müsste dann Leistung zugeführt werden, um die Fallhöhe vernichten zu können. Zur Verdeutlichung ist nochmals in Abbildung 2, der Zusammenhang von Drehzahl und der Betriebskennlinie dargestellt. Für jede PAT-Kennlinie gibt es wiederum einen spezifischen Wirkungsgradverlauf, sowie in Abbildung 3 gezeigt ist.

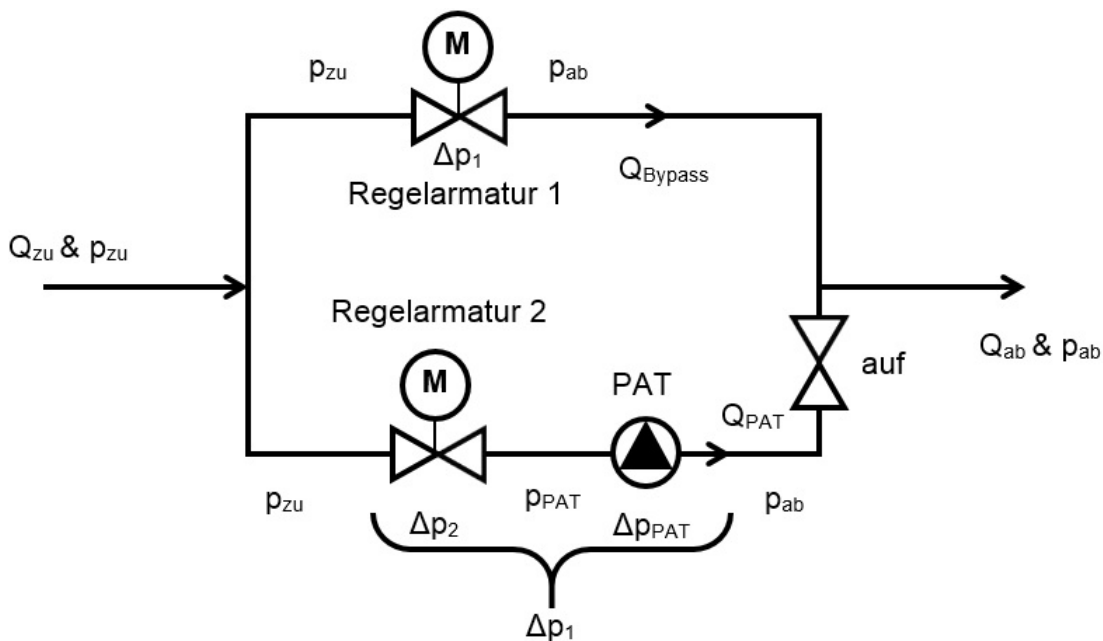
Turbinen haben je nach Typ verstellbare Leit- und/oder Laufschaufeln oder einstellbare Düsen und können so auch bei schwankendem Durchfluss mit einem besseren Wirkungsgrad als PAT's betrieben werden. Durch ihre Flexibilität und Einstellmöglichkeiten, ermöglichen Turbinen eine flachere Wirkungsgrad-Kennlinie nahe ihrem optimalen Betriebspunkt. Es kann bei gleicher Drehzahl, ein veränderter Durchfluss anstehen. Turbinen sind durch ihre Leitvorrichtungen und verstellbare Laufschaufeln kostenintensiver als PAT's, und sind den genauen Bedürfnissen angepasst. Bei einer Turbine kann man durch Verstellmöglichkeiten, bei variablem Durchfluss und konstanter Fallhöhe, die Drehzahl konstant halten. Die optimale Einstellmöglichkeit der Turbine bei anliegendem Durchfluss ermöglicht einen flacheren Wirkungsgradverlauf als bei einer PAT. Aus Abbildung 4 wird ersichtlich, wie sich der Wirkungsgrad von Turbinentypen, in Bezug auf den Durchfluss und die Drehzahl, verhält. Zudem wird bei konstanter Drehzahl und sich wechselndem Durchfluss klar, wie die Düsen oder Leitapparate verstellbar werden. Die Muscheldiagramme der Abbildung 4 stellen verschiedene Einheits-turbinen, verschiedener Turbinentypen dar.

Aus diesen Diagrammen können laut Giesecke u. a. (2014, S.549-553) nun Turbinen vordimensioniert werden. Dies bedeutet, dass der Laufraddurchmesser anhand des gewählten Turbinentyps, der anstehenden Fallhöhe und des Durchflusses bestimmt werden kann. Des Weiteren können die Wirkungsgrade durch die halb empirische Formel von Hutton auf die gewählte Turbinengröße skaliert werden.

#### Betriebsweise mit Durchlaufen der PAT-Kennlinie

Es kann kein angepasster Betrieb durch eine PAT bei konstanter Drehzahl an eine Rohrkennlinie gesteuert werden. Es werden bei dieser Betriebsweise Betriebszustände auf der Kennlinie der PAT genutzt.





\_Abb. 5: Hydraulische Bypassregelung mit einer im Bypass angeordneten Regelarmatur

Die Fallhöhe kann als Funktion des Durchflusses  $H = f(Q)$  angegeben werden. Bei dieser Betrachtung ist der Verlauf der Wirkungsgradkennlinie von großer Bedeutung. Die Strömungsmaschine ist für die Synchrondrehzahl von einem Synchrongenerator auszulegen. Da bei lastabhängigem Betrieb eines Asynchrongenerators ein Frequenzumrichter benötigt wird, kann die Drehzahlauswahl der PAT unabhängig vom Generator gewählt werden.

Nachdem eine PAT mit ihrem optimalen Wirkungsgrad im Arbeitspunkt gewählt worden ist (Abbildung 6), muss man nun für diese das erreichbare Potential ermitteln. Von Belangen sind der Wirkungsgradverlauf, die PAT-Kennlinie, die Rohrkenlinie, sowie die anstehenden Durchflüsse und Fallhöhen. Die Steuerung der Strömungsmaschine entlang ihrer Kennlinie kann durch den Einsatz eines hydraulischen Bypasses realisiert werden (Abbildung 5).

Des Weiteren wird in Abbildung 7 nochmals der Schnittpunkt der PAT-Kennlinie aufgezeigt. Zudem

setzt  $Q_{\min, \text{Betrieb}}$  den minimalen Durchfluss fest, bei welchem die Anlage Strom produziert. Der Wirkungsgrad der PAT senkt sich auf Null ab. Es muss darauf geachtet werden, dass der Wirkungsgradverlauf der Betriebselemente durch die Teillastbeaufschlagung der Strömungsmaschine, nicht konstant ist. Der maximale Durchfluss  $Q_{\max, \text{Betrieb}}$  ist durch die nutzbare Druckhöhe  $H_{\min, \text{Betrieb}}$ , welche auch bei  $Q_{\min, \text{Betrieb}}$  anliegt, gegeben. Befindet man sich links vom Schnittpunkt, so bewegt man sich auf der Kennlinie der PAT. Dies ist grafisch in Abbildung 8 dargestellt. Die restliche Fallhöhe  $H_i$ , Rest, also die Differenz zwischen Rohrkenlinie und PAT-Kennlinie muss durch eine in Reihe geschaltete Regelarmatur dissipiert werden. Somit ist auf der linken Seite jeweils die Leistungskennlinie der PAT direkt nutzbar, da man sich auf der PAT-Kennlinie bewegt. Befindet man sich rechts vom Schnittpunkt (Abbildung 9), so bewegt man sich auf der Rohrkenlinie. Bei diesen Betriebszuständen wird die Bypassregelung herangezogen. Bei Erhöhung des Durchflusses ab dem Schnittpunkt, wird die anliegende Fallhöhe und der spezifische Durchfluss  $Q_{i, \text{PAT}}$  von der PAT-Kennlinie genutzt um Energie zu erzeugen.

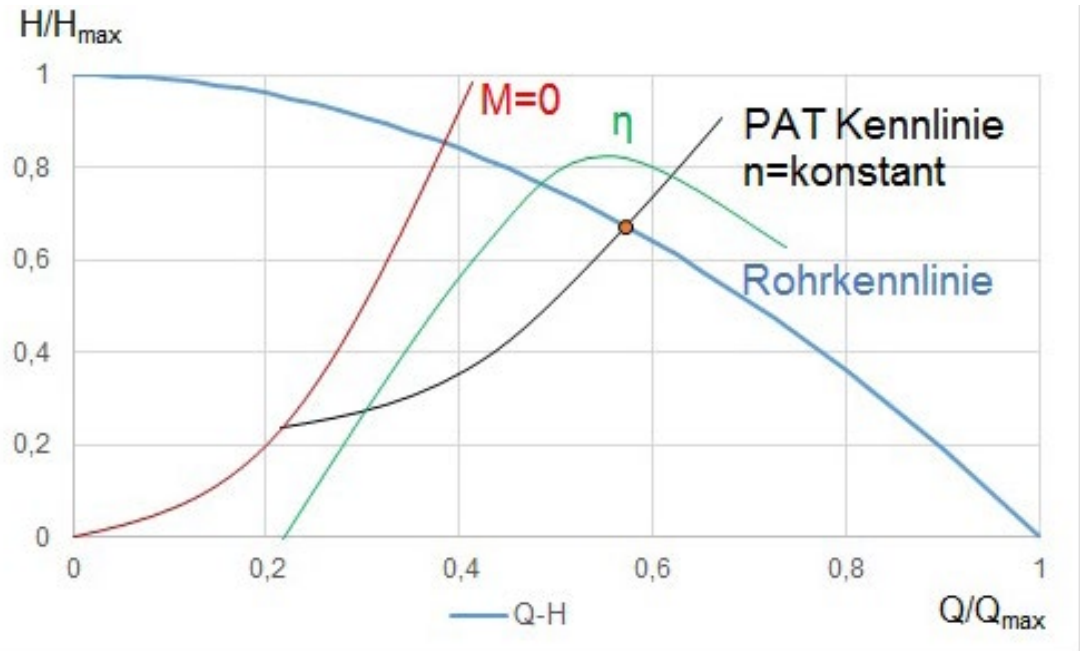


Abb. 6: Gewählte PAT in Bezug des Auslegungspunktes und der Rohrkenlinie

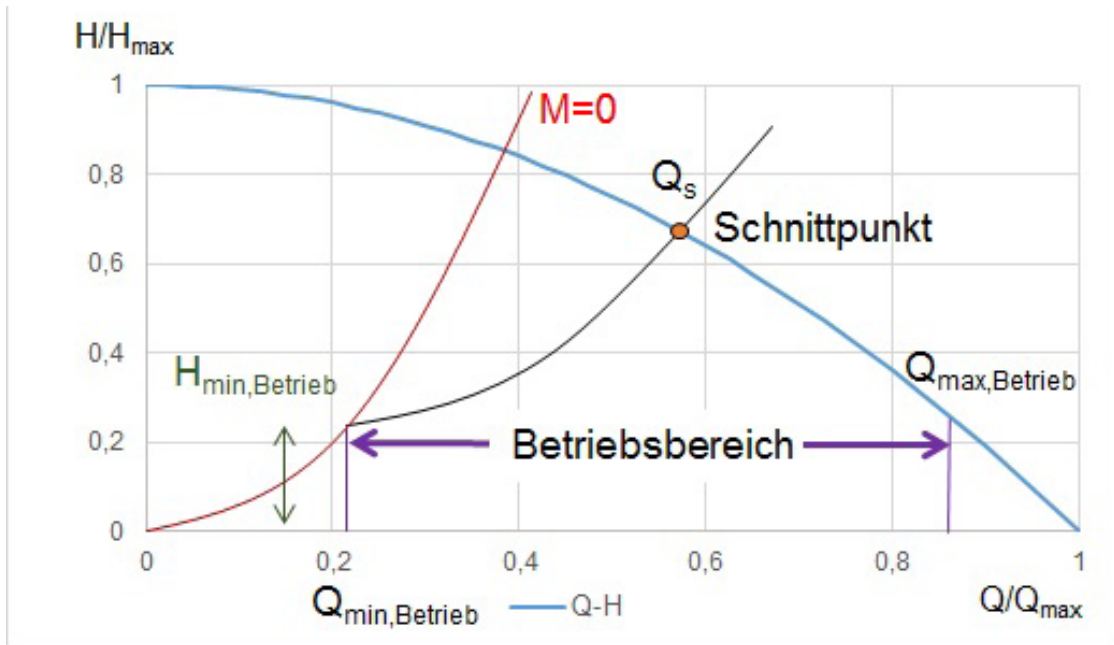


Abb. 7: Darstellung des Betriebsbereiches und der Kenngrößen

Der überschüssige Durchfluss  $Q_{bypass}$  wird über den Bypass geleitet. Hierbei wird auch ersichtlich, dass der optimale Wirkungsgrad der PAT-Kennlinie vor dem Schnittpunkt liegen sollte, da dieser sonst ungenutzt bleiben würde. Außerhalb des Betriebsbereiches erfolgt der Durchfluss durch den Bypass mit einer Regelarmatur.

**Druckminderung mit einer PAT mit durchlaufen einer PAT-Kennlinie**

Das Ersetzen eines Druckminderers durch eine PAT mit Asynchrongenerator mit durchlaufen der PAT-Kennlinie, mit der man die überschüssige Energie zurückgewinnen kann, bedeutet Ansätze, welche Methodiken für verschiedene Betriebsbedingungen beinhalten, herzuleiten. Bei diesem Einsatz von einer PAT werden folgende Elemente zum Betrieb benötigt:

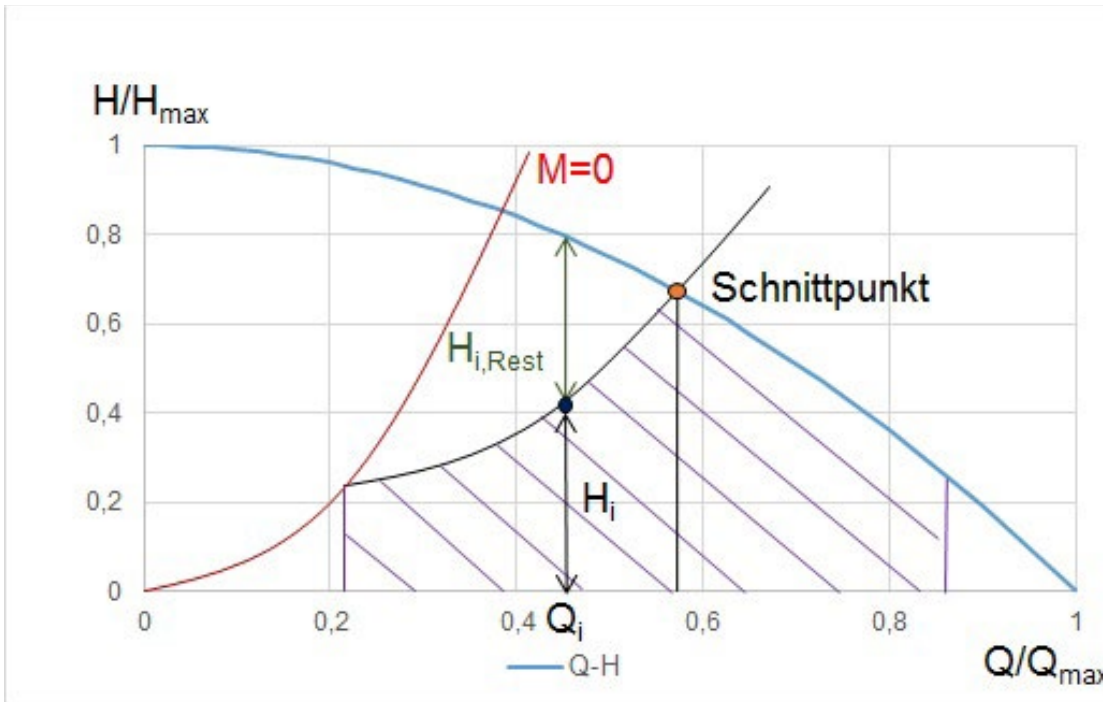
- \_Pumpe als Turbine (Feuchte-Schutzklasse beachten)
- \_Generator (Feuchte-Schutzklasse beachten)
- \_Frequenzumrichter (bei Verwendung eines Asynchrongenerators)
- \_Bypass (für Revisionszwecke und Bypassregelung)
- \_Vorrichtung gegen Druckstoß

- \_Absperroorgane zum abtrennen der PAT vom System
- \_Transformator
- \_Anschluss an das Stromnetz
- \_Bauwerk
- \_Reglungs- und Steuertechnik

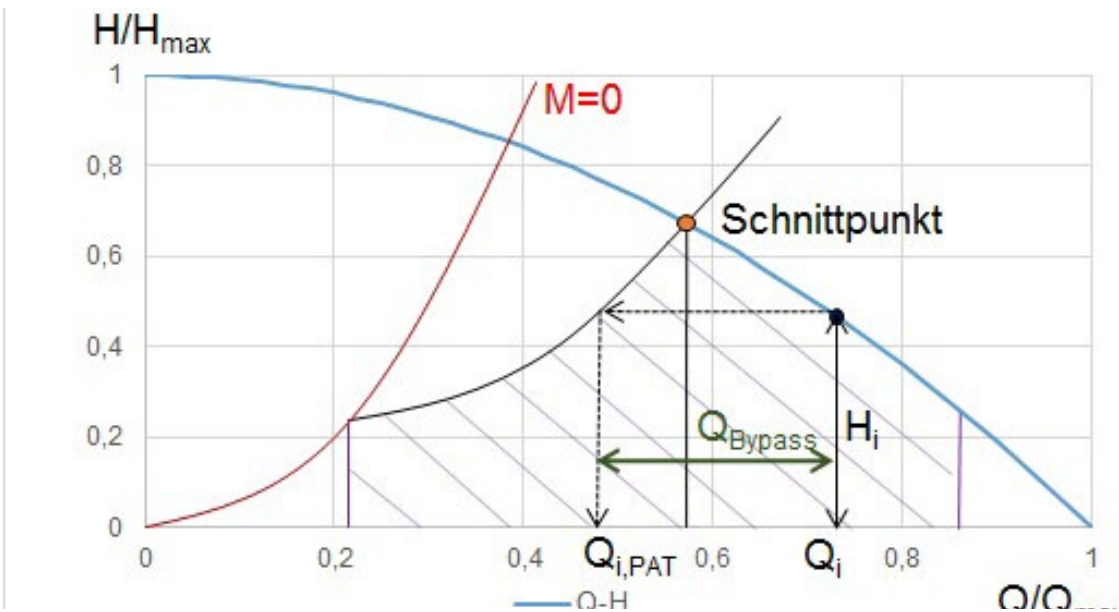
Zusätzlich sind im Einzelfall spezifische Anforderungen und Einrichtungen zu beachten. Die Funktion des Druckminderers kann bei konstanten Rohrnetzparametern, vom vorgeschaltetem System mit folgenden Randbedingungen erfolgen:

- \_Konstanter Durchfluss
- Betriebsbedingt vorgegeben
- Frei wählbar
- \_Variabler Durchfluss
- Betriebsbedingt vorgegeben

Eine Systemdarstellung von einem Druckminderer in einem Versorgungsnetz wird in Abbildung 10 dargestellt. Da die Formeln, sowie die Herleitung der einzelnen Formeln unter den verschiedenen Randbedingungen den Rahmen dieses Artikels überschreiten würden, wird auf meine Masterarbeit (Heinen, 2016) verwiesen.



\_Abb. 8: Betriebszustände, welche sich links vom Schnittpunkt befinden



\_Abb. 9: Betriebszustände, welche sich rechts vom Schnittpunkt befinden

### Anwendung

Um die Herleitung der Methodik der Masterarbeit (Heinen, 2016) auf ihre Anwendbarkeit zu prüfen, wurde ein Fallbeispiel herangezogen. Dabei handelt es sich um ein Durchlaufbehälter, bei welchen durch verschiedene gesteuerte Zuflussmengen das Energiepotential ermittelt werden soll. In diesem Artikel, wird nur auf die Ergebnisse von der vorher beschriebenen Betriebsweise auf der Kennlinie eingegangen. Für das herangezogene Fallbeispiel wurde der maximale Durchfluss  $Q_{max}$  der Rohrkenlinie in  $n = 12$  Durchüsse unterteilt.  $Q_{12}$  wurde jedoch direkt verworfen, da bei maximalem Durchfluss, keine Energieausbeute erfolgen kann. Jedoch wird  $Q_{12}$  als Druckminderer angesetzt, sodass keine hydraulische Entkopplung vorliegt. Der Durchfluss  $Q_{12}$  ist somit nicht konstant sondern von den schwankenden Abnahmen im Netz abhängig. In der nachfolgenden Abbildung, wird die jeweilige Energieausbeute mit der jeweiligen gewählten PAT ersichtlich.

### Schlusswort

Ziel meiner Masterarbeit war es eine Methodik

herzuleiten, um das Potential zur Energierückgewinnung in Wasserversorgungssystemen zu ermitteln. Dies wurde umgesetzt, indem verschiedene Betriebsweisen und Einsatzstandorte hergeleitet worden sind. Mit den jeweils gegebenen Betriebsselementen, ist eine Methodik zur Bestimmung des Energiepotentials gegeben. Durch die definierten Betriebsweisen, wie das Betreiben einer Pumpe als Turbine in einem Arbeitspunkt, auf einer Kennlinie mit konstanter Drehzahl und bei variabler Drehzahl, konnte die Potentialermittlung für ein Fallbeispiel durchgeführt werden.

Der im Behälter vorliegende freie Zulauf wurde durch eine überschaubare Auswahl von radialen Pumpen als Turbinen bei unterschiedlichen Durchüssen und Betriebsweisen auf das ausnutzbare Potential untersucht. Zudem wurde eine Betrachtung, wie bei einem Druckmindererstandort an der gegebenen Stelle, in Betracht gezogen. Die vorliegenden Ergebnisse konnten gegenüber gestellt werden und es liegen vergleichbare Potentiale mit den jeweils gegebenen Betriebsselementen vor. Dennoch ist die Nutzung dieser Ergebnisse für eine Kostenvergleichsanalyse mit Vorsicht zu behandeln, da durch die Ermittlung der Turbinenkennlinien



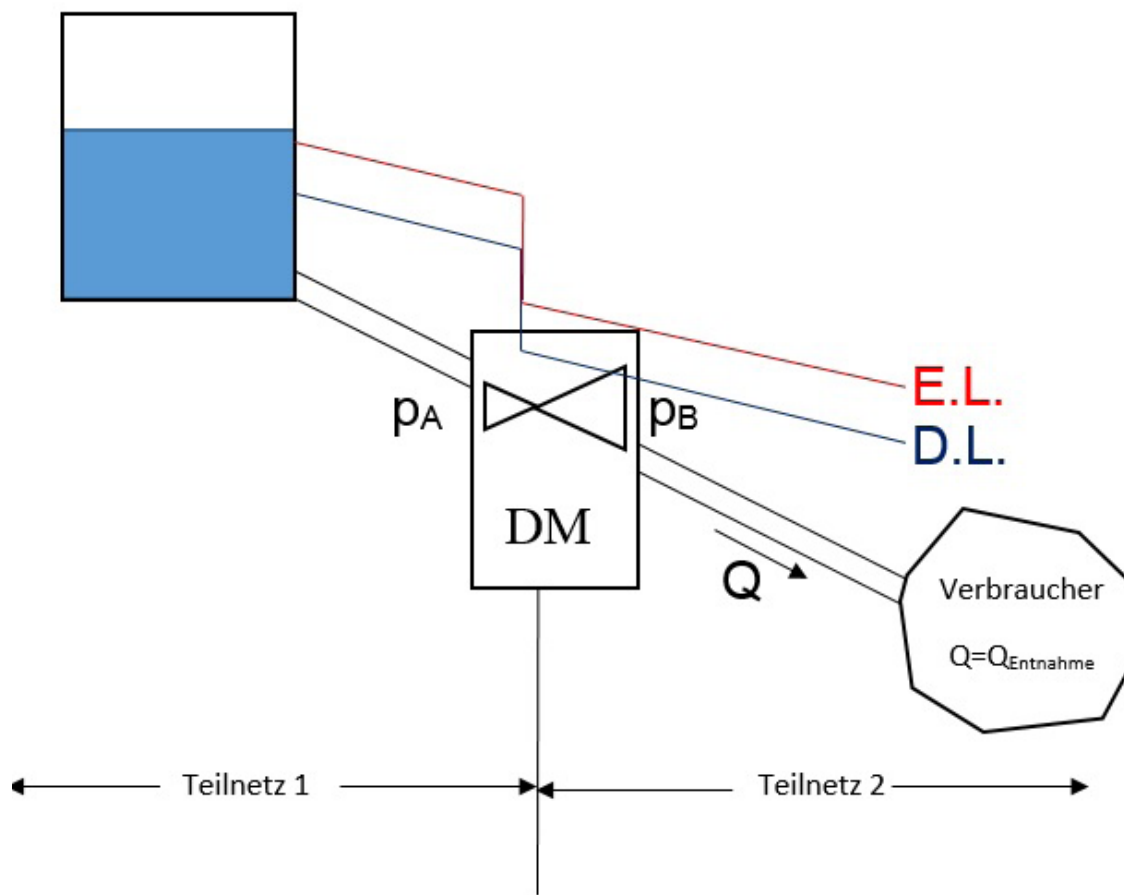


Abb. 10: Systemdarstellung: Druckminderer

mit empirischen Korrelationen, große Abweichungen zur realen Turbinenkennlinie vorliegen können. Bei vorliegen repräsentativer Eingangsdaten und genauen Kennlinien, kann eine genaue Potentialermittlung der unterschiedlichen Betriebsweisen erfolgen. Mit den jeweils gegebenen Betriebselementen kann nachfolgend eine Kostenvergleichsanalyse durchgeführt werden. Durch Vereinfachungen oder nicht repräsentative Daten oder angenommene Kennlinien, kann nur eine Schätzung des Energiepotentials erfolgen. Aufbauend auf diese Arbeit, können weitere Verfahren für andere Betriebsweisen

entwickelt werden und somit die bereits hergeleiteten Methodiken ergänzen. Des Weiteren wird darauf verwiesen, durch Programmierung ein effizientes Berechnungswerkzeug zu entwickeln, welches mit Hilfe von Eingangsdaten die jeweiligen Energiepotentiale ausgibt. Zudem müssten Turbinen- und PATkennlinien durch Versuchsaufbauten hergeleitet werden und von den Herstellern veröffentlicht werden, um das genaue Energiepotential der untersuchten Strömungsmaschinen besser bestimmen zu können, da man sonst auf streuende empirische Korrelationen zurückgreifen muss.

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12
65-40-250	15453,68	6875,10	3974,54	2498,50	1478,82	807,05	359,53	0,00	0,00	0,00	0,00	4963,26
65-50-125	2561,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,31	337,38
65-50-160	4761,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	82,74	0,00	0,00	226,38
65-50-200	12639,57	0,00	0,00	1235,86	1554,17	1531,91	1357,44	818,30	0,00	0,00	0,00	2026,21
65-50-250	20178,30	14770,55	8779,78	5752,04	3810,85	2298,04	1330,50	465,08	0,00	0,00	0,00	2538,66
125-100-160	0,00	1707,42	4927,82	4671,83	0,00	0,00	0,00	0,00	886,27	1143,55	153,88	0,00
125-100-200	0,00	3544,25	9500,63	11328,18	3027,24	3881,96	5097,84	3881,67	2371,81	819,30	0,00	0,00
125-100-250	0,00	4877,65	10956,59	10571,04	7619,96	6132,33	4918,24	2575,40	924,98	0,00	0,00	0,00
150-125-200	0,00	0,00	0,00	2659,33	3363,54	1011,86	0,00	0,00	920,10	791,64	0,00	0,00
150-125-250	0,00	0,00	0,00	3784,66	6519,10	7494,73	6795,34	4721,27	2429,36	0,00	0,00	0,00
200-150-200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2717,96	4458,59	4965,30	5419,35	2839,06	0,00	0,00
200-150-250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3710,55	6189,02	7085,99	4893,52	1182,83	0,00	0,00

\_Abb. 11: Energiepotential der Gesamtanlage in [kWh] bei gewähltem Durchfluss und jeweiliger PAT, auf ein Jahr hochgerechnet

#### Literaturverzeichnis

- [Burger und Andermatt 1997] Burger, Peter ; Andermatt, Martin:  
Trinkwasserkraftwerke: Technische Anlagendokumentation.  
Bundesamt für Energiewirtschaft Bern, 1997
- [Giesecke u. a. 2014] Giesecke, Jürgen ; Heimerl, Stephan ; Mosonyi,  
Emil: Wasserkraftanlagen: Planung, Bau und Betrieb. Springer-  
Verlag, 2014
- [Gülich 2014] Gülich, Johann F.: Kreiselpumpen: Handbuch für  
Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb. Springer-Verlag, 2014
- [Heinen 2016] Heinen, Eric: Ermittlung des Potentials zur  
Energierückgewinnung in Wasserversorgungssystemen. Karlsruher  
Institut für Technologie, 2016
- [Kilchmann und Müller 2004] Kilchmann, Anton ; Müller, Ernst A.:  
Energie in der Wasserversorgung: Ratgeber zur Energiekosten- und  
Betrieboptimierung. Bundesamt für Energie BFE, 2004
- [Lang und Vaas 2014] Lang, Cornelia ; Vaas, Markus O.:  
Hydraulik von Rohrsystemen / Institut für Hydromechanik. 2014.  
Forschungsbericht
- [Rösler 2015] Rösler, Wolfgang: Einsatz von Pumpen als Turbinen /  
Institut für Wasserwesen Mitteilungen Heft 123/2015 Tagungsband  
zum 7. Seminar Wasserversorgung. 2015. Forschungsbericht

The thesis from which this article results, discusses new techniques that have been investigated to enhance backward adaptive linear predictive encoders, which were often at a disadvantage compared to forward adaptive encoders when operating in low data rate environments. Special attention is given to the noise shaping aspect, which can improve human perception of speech signals.

Prix d'excellence 2016 mention très bien

# BACKWARD ADAPTIVE LINEAR PREDICTIVE CODING WITH NOISE SHAPING

Marc Dielissen

## Background

Nowadays, where multimedia data is sent all over the world, two aspects remain essential: a low data rate and a good quality of the signal. In digital voice transmission, linear predictive encoding helps to reduce the energy of such a signal  $x(k)$  by transmitting only the residual signal  $d(k)$ . To calculate the latter, the encoder creates an estimate  $\hat{x}(k)$  of the signal and compares it to the original. By transmitting their difference, the decoder can reconstruct the original. To optimise the estimate  $\hat{x}(k)$ , the coefficients used by the linear predictor need to be adapted constantly. This can be achieved by using one of two different approaches: backward adaptive (closed-loop) encoding or forward adaptive (open-loop) encoding. Figures 1 and 2 show the respective encoders after z-transformation.

In the open-loop case, the coefficients are calculated for a time frame of the signal and transmitted alongside the residual. The decoder can then use the same coefficients to calculate the estimated signal  $\hat{x}(k)$  and synthesise (=reconstruct) the original. As the coefficients are calculated before the encoding process, they are optimal in the sense that the residual signal has the lowest possible energy. While the quality of the used prediction coefficients is very high, this approach has two downsides.

The first lies in the need of buffering, which is necessary to calculate the coefficient values. This results in a small delay, dependent on the length of the buffer. The second downside is the necessary transmission of the prediction coefficients, which increases the data rate.

Opposed to the open-loop encoding, the closed-loop counterpart adapts its prediction coefficients using the values of the samples that have already been processed. Since the same values are available at the decoder side (assuming a correct reconstruction), the prediction coefficients do not need to be transmitted. Furthermore, the calculation of the coefficients is done in parallel to the processing of the speech signal. Hence, no buffering of the signal is necessary. The downside of this approach lies in the quality of the prediction coefficients, which are no longer optimal.

The encoders described above both operate digitally, which means that the transmitted values are all quantized. The difference between the original value and its quantised counterpart is called quantisation noise, which is assumed to be unbiased, additive and white (=uncorrelated) in our case. The energy of the noise is dependent of the number

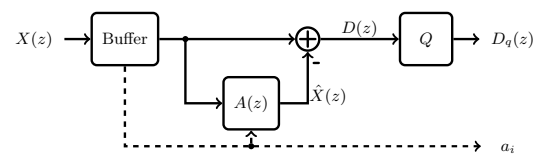


Fig. 1: Open-loop encoder.  $D_q(z)$  is the quantised residual signal and  $Q$  the quantiser. The prediction coefficients  $a_i$  of the linear predictor  $A(z)$  need to be transmitted as well

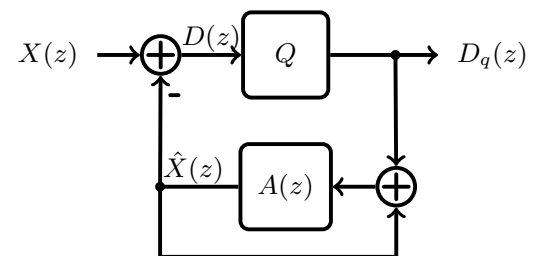


Fig. 2: Closed-loop encoder. The estimated signal  $\hat{X}(z)$  is generated from reconstructed values

of bits used in the quantiser. While quantisation noise is produced by both the open-loop and the closed-loop encoder, its nature is different after the synthesis of the speech signal. After the reconstruction of the speech signal, the open-loop decoding structure filters the quantisation noise with the prediction filter. As a result, the noise's energy is increased and its spectral envelope (the envelope curve of the spectrum) approximates the one of the speech signal. When using a closed-loop encoder on the other hand, the quantisation noise remains unfiltered after the signal synthesis. This leaves the noise white and the reconstructed signal with a higher SNR (Signal to Noise Ratio) than in the previous case.

When comparing the reconstructed signal with the original signal, a high SNR indicates that the energy of the noise is low compared to the energy of the signal. A high SNR is therefore the main objective in most applications. With speech signals however, the perception of the signal is most important. White noise for example can be more disturbing than coloured noise, even with a higher SNR. Especially noise with a spectral envelope similar to the respective signal can be masked and hence result in a better perception. A different evaluation criteria than SNR can therefore be used to quantify the signal quality: PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality). The result of



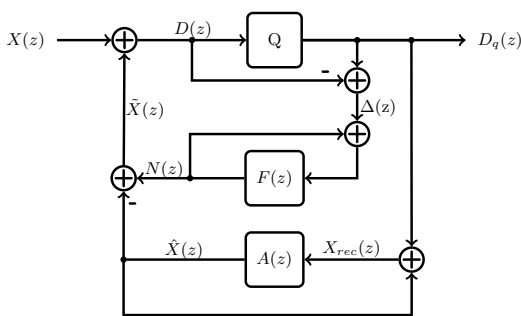


Fig. 3: Closed-loop encoder with noise shaping.  $F(z)$  represents the noise shaping filter.  $\Delta(z)$  is the quantisation noise and  $N(z)$  the filtered quantisation noise.  $X_{rec}(z)$  is the reconstructed signal

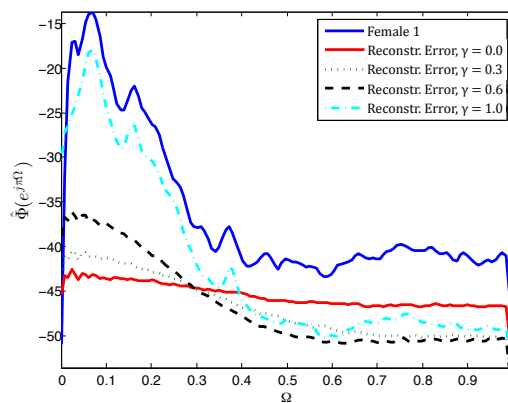


Fig. 4: Test results (Estimated Power-Spectral-Density over normalized frequency) of the G. 726 at 16kbit/s with noise shaping applied to Female1. The GAL-filter was used for the noise shaping. The higher gamma, the more the reconstruction noise is shaped

PESQ evaluation is given in MOS (Mean Opinion Score) and has a range from -0.5 to 4.5, 4.5 being the best.

With this evaluation score in mind, the open-loop encoder has had another advantage over the closed-loop encoder in the past: by adding a filter to the structure, the spectral shaping of the noise can be adjusted, a concept generally known as noise shaping [1]. By choosing the correct filter, the MOS of the reconstructed signal can be optimised. This process has more impact the higher the noise energy and is hence very useful in low data rate environments.

**Backward adaptive encoding with noise shaping**

While the closed-loop encoder generally has the advantage of having a low delay and no need of transmission of prediction coefficients, the missing possibility to shape the noise has often been considered a big disadvantage. This can however be remedied by modifying the structure of the encoder (see Figure 3). By including an additional filter  $F(z)$ , the quantisation noise is also filtered, which reduces the SNR, but colours its spectrum. The noise is hence not uncorrelated anymore.

As the spectrum of the noise depends on the used filter, choosing filter coefficients close to the prediction coefficients results in a spectral envelope of the speech signal. This can be achieved by selecting  $F(z)=A(z)/y$ ,

$y$  being an adjustable parameter in the range from 0 to 1, where  $F(z)$  denotes the noise shaping filter and  $A(z)$  the prediction filter.

By adding the parameter  $y$ , it is possible to weigh the impact of the filter. When using the described structure, the closed-loop encoder can hence be extended with noise shaping [2]. Furthermore, as the filter coefficients of the filter  $F(z)$  can be deduced from the prediction coefficients, only a little computational complexity is added.

To test the backward-adaptive linear predictor with noise shaping, the described structure was added to an existing codec, namely the G. 726 and later to the G. 722, which, simplified, can be described as a G. 726 applied to two frequency bands. The concept was tested on three different speech signals: Female1, Female2 and Male1. For the tests, 4 different filter structures were used for the noise shaping: an ADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation)-, a NLMS (Normalized Least Mean Square)-, a GAL (Gradient Adaptive Lattice)- and a block-adaptive filter. Each filter was additionally weighted by a variable gamma factor to adjust the amount of noise shaping:  $F(z/y)$ .

The G. 726 offers data rates of 16, 24, 32 or 40kbit/s, which corresponds to 2, 3, 4 or 5 bits per sample. For the tests, data rates of 16 and 24kbit/s were used, so the noise shaping has

-1 B.S. Atal and M.R. Schroeder: Predictive coding of speech signals and subjective error criteria. In IEEE International Conference on ICASSP '78, volume 3. IEEE, 1979  
 -2 Srikanth Korse, Hauke Krueger, Matthias Pawig and Peter Vary: Linear predictive coding with backward adaptation and noise shaping. In ITG Conference on Speech Communication. VDE, 2014

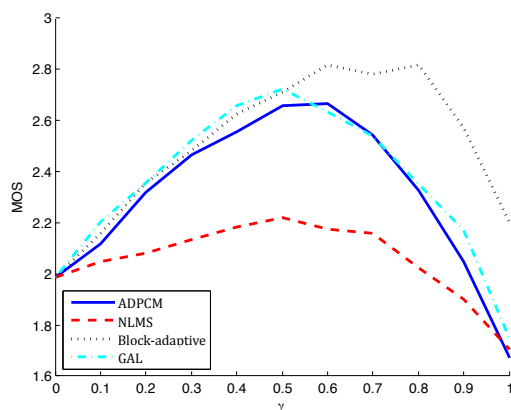


Fig. 5: PESQ evaluation of Male1 after reconstruction

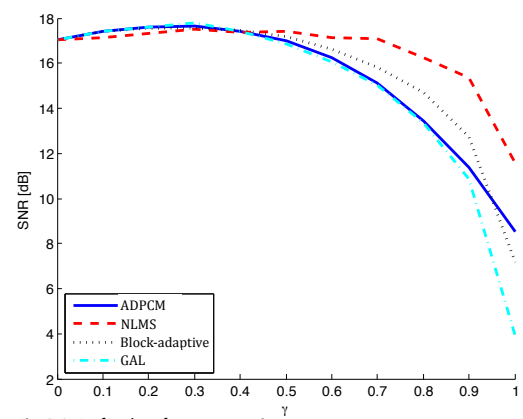


Fig. 6: SNR of Male1 after reconstruction

more influence. Figure 4 shows an example using the GAL-filter, which obtained the best results. As can be seen, the spectral envelope of the reconstruction noise is fitted to the spectrum of the original signal and the overall energy of the noise increases with  $\gamma$ . Figures 5 and 6 show the behaviour of the SNR and the MOS with regard to  $\gamma$ . While the SNR is reduced with increasing  $\gamma$ , the MOS increases before decreasing. Even though the values differ a little, the general behaviour is the same with the other test signals.

In a second test, the noise shaping structure was added to the G. 722 audio codec. The G. 722 applies a low-pass and a high-pass filter to a speech signal before encoding, such that a lower band with frequencies from 0 to 4000Hz and a higher band with frequencies from 4000 to 8000Hz are created. On both frequency bands, the same encoding as in the G. 726 is applied, either with 4, 5 or 6 bits per sample on the lower band and 2 bits per sample on the higher band. During the tests, the noise shaping structure was added to the two frequency bands.

As with the G. 726, the noise shaping filter adapted the envelope of the quantisation noise to the one of the speech signal. However, the results showed that in the lower frequency band, the noise shaping has much more influence on the perception: similar curves than the ones with the noise shaping applied to the G. 726 were found. The optimal  $\gamma$ , in terms of MOS, was in the same range and the MOS was increased before decreasing again. Applied to the higher frequency band however, the MOS behaved rather randomly with increasing  $\gamma$  and the optimum was

different for each signal. The explanation for this can be found in the spectrum of speech signals: The energy of the signal is mostly concentrated in the lower frequency band. Furthermore, human perception is more sensible to the frequencies of the lower frequency band.

### Hybrid digital-analogue coding

Up until now, the transmission has been purely digital. In the following system, an analogue transmission path is added for the quantisation noise (Figure 7). This system is known as hybrid digital-analogue coding, since both digital and analogue transmissions are used [3]. In a digital channel, the transmission will saturate when the channel quality reaches the saturation point. The analogue counterpart however will still improve. To use hybrid coding, analogue transmission has to be possible. Since the channel noise is usually considered AWGN (Additive White Gaussian Noise), this is given.

As with the backward-adaptive linear prediction, a noise shaping filter can also be added to the hybrid transmission. Unlike before, it is the channel noise that is shaped and not the quantisation noise. During the tests, it could be seen that the spectral envelope of the noise from the reconstructed signal was again fitted to the one of the original signal, which was also confirmed by listening to the reconstruction noise.

To analyse the improvement of the signal due to the noise shaping, tests were performed with a channel quality cSNR (Channel Signal to Noise Ratio) of 10 dB. As with

the purely digital transmission, the perception of the signal could be improved at the expense of the SNR. The optimal value for  $\gamma$  and the gain in MOS were dependent on various factors, including the number of bits used for the digital transmission and the channel quality.

Further tests were performed to compare the hybrid transmission with 2 bits used for the quantisation of the digital encoding and a purely digital transmission using 3 quantisation bits. Both systems used noise shaping with the same filter structure and two different cases of channel encoding were used. For each case, a channel quality equal to the saturation quality was simulated. While, in terms of MOS, the hybrid transmission was better for 2 of the 3 test signals, the third was better with the digital system. Whether it is better to use digital or hybrid coding is therefore strongly dependent on the channel quality and the signal to transmit. No general conclusion could be drawn regarding this point.

Before the analogue transmission of the quantisation error, its energy needs to be normalized. This requires the system to buffer a part of the noise, calculate its power and normalise it. The normalisation coefficient needs to be transmitted as well, so the decoder can reconstruct the noise. This leads to a delay in the transmission, which is why a different approach was investigated: backward-adaptive power estimation. In this approach, the power of the quantisation noise is estimated using the samples already available to the encoder and the decoder respectively, similar to the signal prediction of the closed-loop encoder. This way, no buffering is needed and the transmission of the normalisation factor can be omitted as well.

Although the proposed structure works in the absence of noise, its presence leads to instabilities from which the system does not recover, since the reconstruction errors propagate. Adaptations to the design might render the backward power estimation possible, but it does not work in the way described above. The issues of the delay and the necessary transmission of the normalisation factor could therefore not be solved within the scope of the thesis.

### Conclusion

The main focus of the thesis was on noise shaping in combination with a backward adaptive linear predictive encoder. The feasibility of this aspect has been verified and

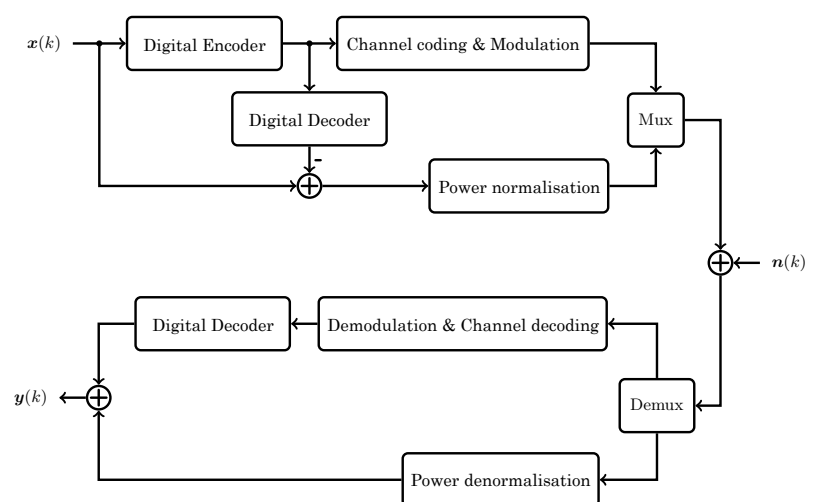


Fig. 7: Hybrid digital-analogue transmission encoder and decoder

compared to existing audio codecs, which could be improved by including such a filtering process. The second focus was on noise shaping in combination with hybrid digital-analogue transmission, which was shown to be possible as well and could further improve such a system.

Next to the main points, further aspects were analysed that are not covered by the present article. These include different filter structures in the core encoder of the G. 726 audio codec, long-term prediction of speech signals using a Kalman filter and the comparison between the performance of a Kalman filter and a GAL-filter applied to autoregressive processes. Some of these topics also proved useful in further optimising closed-loop encoders.

In conclusion, the transmission of speech signals with low data rates using a closed-loop encoder is a concept that can still be improved and include features that have previously only been available with open-loop encoders. Modified old audio codecs could then still be used in the future and transmit speech signals with good quality and low data rates.



Prix d'excellence 2016 mention très bien

# UNTERSUCHUNGEN ZUR BESTIMMUNG DES EINFLUSSES AUF DAS VERBUNDVERHALTEN VON TEXTILBETON INFOLGE OBERFLÄCHENMODIFIKATION DER TEXTILEN BEWEHRUNG\_

Tom Steichen, M.Sc. RWTH Aachen

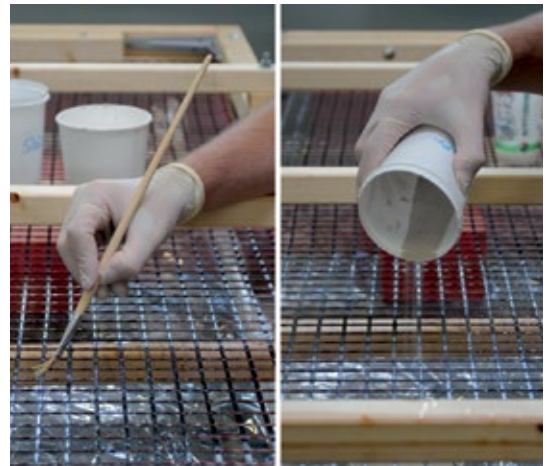


\_Schalenförmiges Textilbetonbauwerk /Ehl12/

Neben der bisher üblichen Stahlbewehrung gewinnen technische Textilien seit einigen Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung. Die industriell hergestellten Fasermaterialien werden bereits seit Jahren erfolgreich im Flugzeug- und Automobilbau eingesetzt. Diese Entwicklung haben viele Bauingenieure sich bereits zu Nutze gemacht und setzen die Textilien mittlerweile auch erfolgreich im Bauwesen ein. Die Vorteile der Textilbewehrung liegen in ihren physikalischen Eigenschaften. Die Unempfindlichkeit gegenüber der Korrosion ermöglicht eine Betondeckung des Materials von nur wenigen Millimeter. Zudem ist die Zugfestigkeit der netzartigen Textilbewehrung viel größer als jene der handelsüblichen Stahlbewehrung. Folglich wird ein wesentlich geringerer Bewehrungsquerschnitt im Bau von Textilbetonbauwerken benötigt. Somit können mithilfe des Textilbetons leichte, dünne, filigrane, frei formbare und sogar dauerhafte Bauobjekte entstehen.

## Motivation und Zielsetzung

Trotz einer gewissen Ähnlichkeit des Tragverhaltens zwischen dem Textil- und dem Stahlbeton gibt es wesentliche Unterschiede, dies unter anderem bei der Verbundkraftübertragung, den Geometrien und den Dehnsteifigkeiten. Bekanntlich wird im Stahlbeton der Verbund über die auf der Stahlbewehrung angeordneten Rippen in den Beton gewährleistet, im Textilbeton ist eine solche mechanische Kraftübertragung wegen mangelnder Rippen allerdings ausgeschlossen.

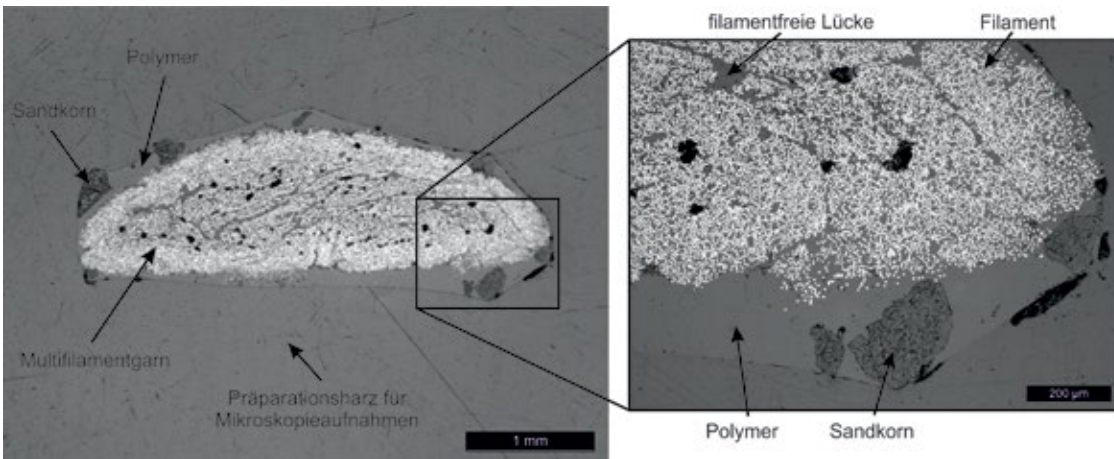


\_Oberflächenmodifikation; Links: Auftragen des Polymers mittels Pinsel; Rechts: Streuen des Sandes auf das frisch getränkte, noch nicht ausgehärtete, Textil

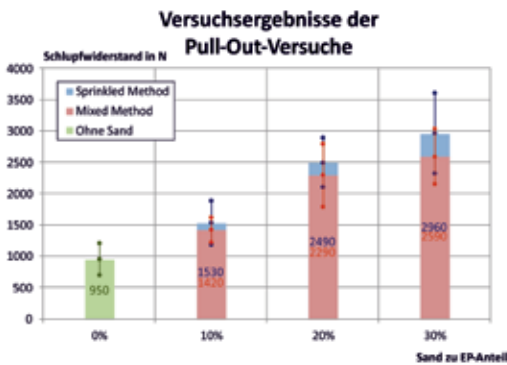
Im Rahmen dieser Masterarbeit werden daher unterschiedliche Untersuchungen zum Verbundverhalten von oberflächenmodifizierten Textilien durchgeführt. Das Ziel der Arbeit liegt in der Optimierung des Verbundverhaltens von getränkten Textilgelegen in einer Betonmatrix. Durch den Einbau einer solchen Textilbetonschicht als Verstärkungs- oder Sanierungsmaßnahme sollen beispielsweise minderfeste Betone verstärkt und bestenfalls auch eine fortschreitende und schädigende Rissbildung verhindert werden. Ein verbessertes Verbundverhalten des Textils im Beton soll dabei zu einer feineren Rissverteilung und somit zu einem unschädlichen Rissbild in der Sanierungsschicht von beschädigten Bauwerken führen.

## Modifikation des Textils

Das eingesetzte textile Material, Carbon-Textil, besteht aus einem Geflecht von einzelnen Garnsträngen, auch noch als Roving bezeichnet. Ein solcher Roving, mit einer Querschnittsfläche von ca.  $1,83\text{mm}^2$ , besteht aus 50000 einzelnen Filamenten und besitzt eine Garnfeinheit von  $3300\text{ tex (g/km) /SGL15/}$ . Die Garnfeinheit beschreibt die Größe des Garns und steht im Zusammenhang mit der Anzahl an Endlosfasern, der Dichte und des Durchmessers der Filamente. Zum Vergleich, ein Carbon-Filament hat ein Durchmesser von ca.  $7\mu\text{m}$  und ist somit in etwa zehnmal dünner als ein menschliches Haar.



\_Mikroskopaufnahme eines mit Epoxidharz getränkten und oberflächenmodifizierten Carbonrovings

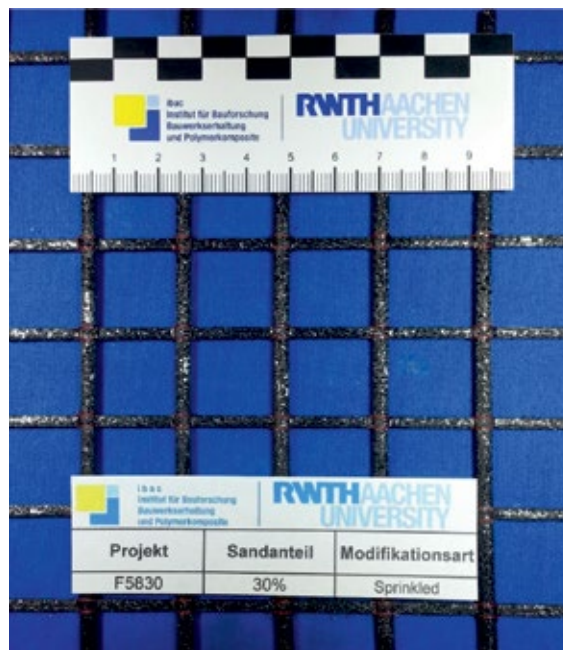


\_Auswertung eines Pull-Out-Versuchs

Unter Oberflächenmodifikation versteht man eine Verbesserung der Oberflächenstruktur eines Materials, im Falle dieser Abschlussarbeit dem getränkten Carbon-Textil. Als Material der Oberflächenmodifikation wird Quarzsand mit einem Korndurchmesser von 0,2 bis 0,6mm eingesetzt das auf zwei verschiedene Methoden auf das noch ungetränkte Textil aufgetragen wird. Dies wäre zum einen die Sand Sprinkled Method, in der zuerst das Tränkungs polymer auf das Textil aufgetragen und anschließend der Sand über das feuchte Polymer gestreut wird. Zum anderen gibt es die Sand Mixed in Epoxid Method, in der der Sand dem Polymer beigemischt wird, bevor dieses mittels Pinsel auf das Bewehrungsmaterial aufgetragen wird. Zudem werden unterschiedliche Sandmengen als Oberflächenmodifikation zur Vergleichsermittlung eingesetzt; ein Referenztextil ohne Oberflächenmodifikation soll den Vergleich der absoluten Verbundverbesserung ermöglichen. Die unterschiedlich modifizierten Textilien, die eigenhändig am Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen modifiziert wurden, werden, im Rahmen der experimentellen Untersuchungen, jeweils verschiedenen Versuchsmethoden unterzogen um eine allgemeingültige Aussage bezüglich der Verbundverbesserung zu erzielen.

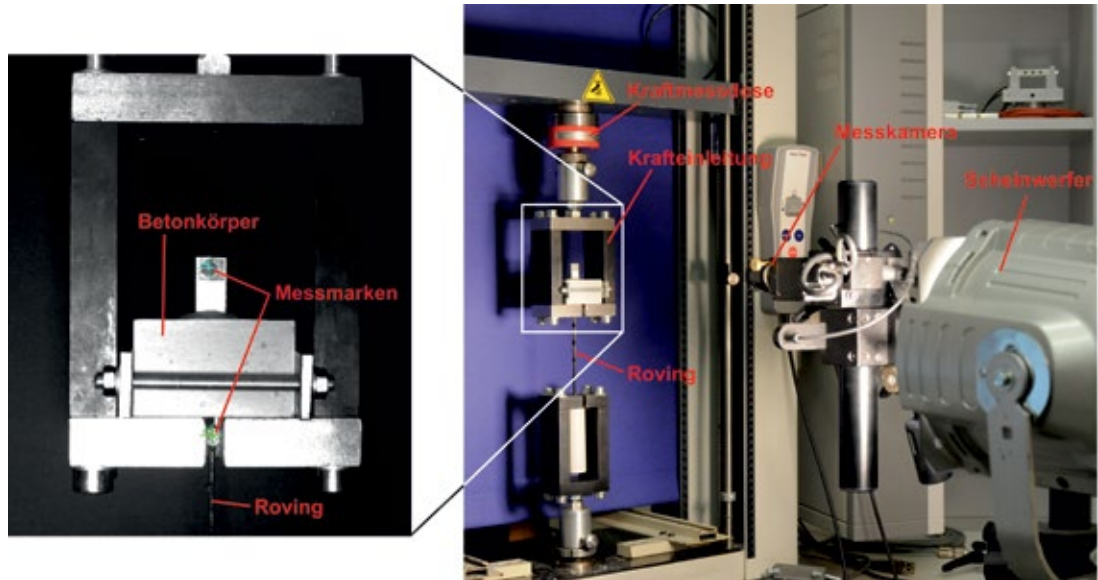
**Versuchsvorbereitung und -durchführung**

**\_Rovingzugversuche**  
Im Rahmen der Rovingzugversuche (Festigkeitsprüfungen) wird im Rahmen zahlreicher Vorversuche eine optimale Verankerungstechnik für das hochfeste textile Bewehrungsmaterial ermittelt, da die Lasteinleitungsmethoden, wie sie in

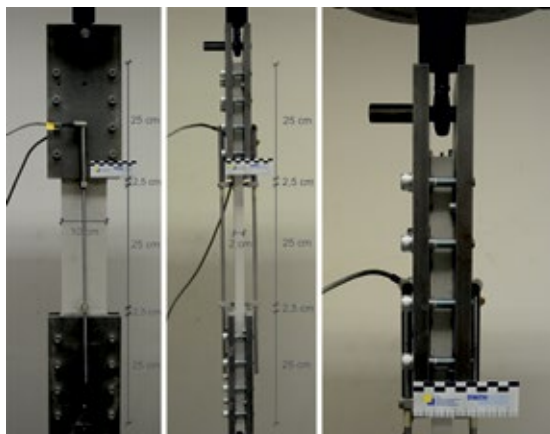


\_Beispiel eines modifizierten Textils

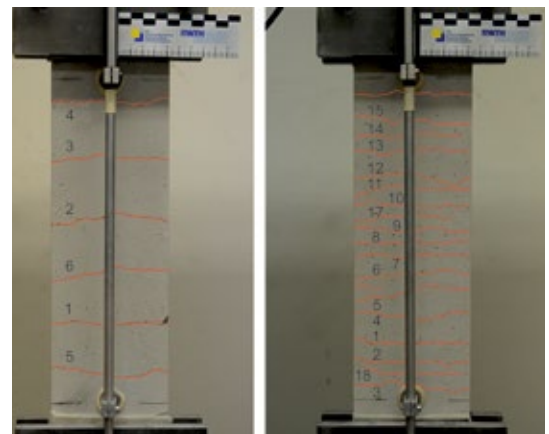
vorangegangenen Untersuchungen eingesetzt wurden, aufgrund der sehr hohen Materialfestigkeiten im Rahmen dieser Abschlussarbeit versagen. Schlussendlich werden die Rovingzugproben der Hauptuntersuchungen an beiden Enden mit einem hochfesten Epoxidharz (Metallpolymer) versehen um anschließend mittels Klemmbacken zu greifen und zu prüfen. Obwohl diese Art der Lasteinleitung von einigen Autoren als ungeeignet und sogar zum Teil, für das zu prüfende Material, als schädigend eingestuft werden, kann die Lasteinleitung für derartig feste Rovings nur über diese Weise stattfinden. Das Ziel der Rovingzuguntersuchungen liegt darin, eine mögliche Beeinflussung der unterschiedlichen Modifikationsmethoden bzw. Sandanteile hinsichtlich der Materialfestigkeit zu erfassen. Eine Schädigung der einzelnen Filamente im Roving durch die scharfen Kanten des Sandkorns ist daher nicht ausgeschlossen. Jedoch wird bereits zu Beginn der Versuche erwartet, dass entweder keine oder eine vernachlässigbar geringe Beeinflussung auf die Zugfestigkeit stattfindet. Im Laufe der Versuche stellt sich allerdings heraus, dass die Streuungen der unterschiedlichen Serien einem zu hohen, unnatürlichen, Ursprung unterliegen.



\_Versuchsaufbau der Pull-Out-Versuche einschließlich des optischen Messsystems



\_Aufbau des Dehnkörperversuchs



\_Gegenüberstellung zweier Rissbilder nach Versuchsabschluss; Links: Probekörper ohne Oberflächenmodifikation; Rechts: Probekörper mit Oberflächenmodifikation (Sandanteil von 30 M.%)

Einige mögliche Gründe für die auffällige Varianz sind auf den manuellen Herstellprozess zurückzuführen, was jedoch im Rahmen der Untersuchungen nicht eindeutig belegt werden kann.

#### \_Pull-Out-Versuche

In anderen Vorversuchen wird die Einbindelänge der Textilgarne für Pull-Out-Versuche, auch noch als Ausziehversuche bekannt, aus einer Betonmatrix ermittelt. Anhand dieser Versuche wird der Haftverbund zwischen beiden Materialien ermittelt. Im getränkten jedoch unmodifizierten Zustand des Textils wird der Großteil der Verbundspannungen über Adhäsion zum Beton übertragen. Wird die Verbundspannung im Roving überschritten, so tritt ein stetig sinkender Reibverbund auf. Durch das Modifizieren der zuvor glatten Oberflächenstruktur wird der Grad der Kraftübertragung allerdings erhöht /Jes10/.

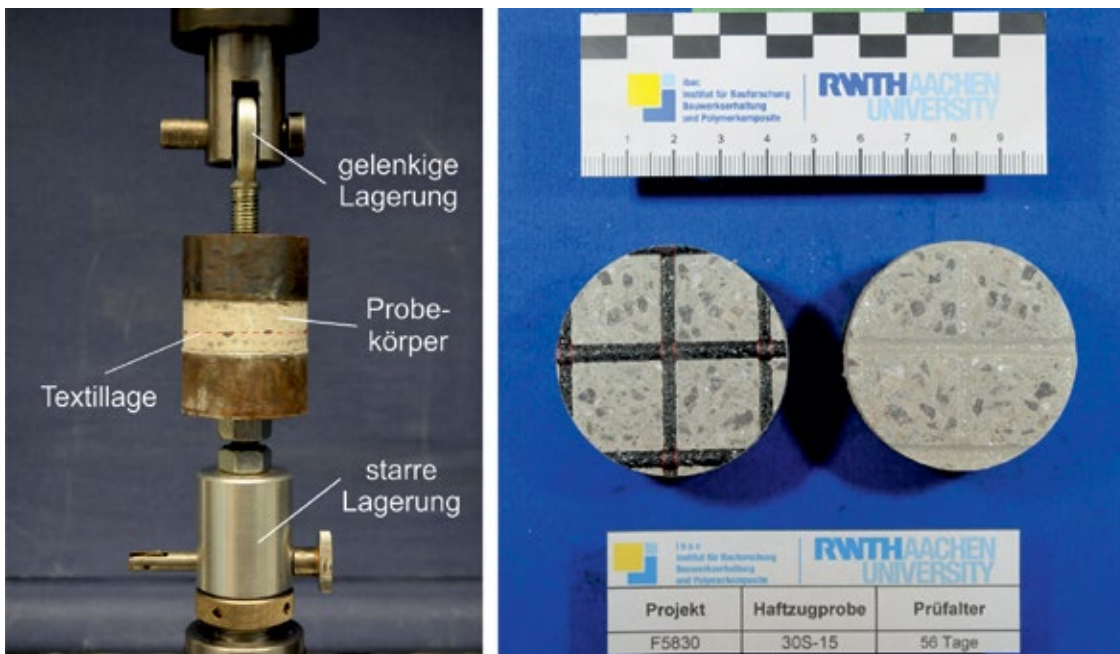
Im Rahmen der durchgeführten Versuche soll die Betonmatrix der Versuchskörper so gewählt werden, dass der Betonprobekörper nicht durch die entstehenden Querkräfte aufgespalten wird. In der entwickelten Prüfvorrichtung kann somit die durch die Oberflächenmodifikation hervorgerufene Verbundverbesserung in Form des Ausziehwiderstandes erfasst werden. Die Erkenntnisse der Versuchsergebnisse übertreffen dabei jegliche Erwartungen; es wird eine Verbundsteigerung um bis zu 200% festgestellt.

#### \_Dehnkörperversuche

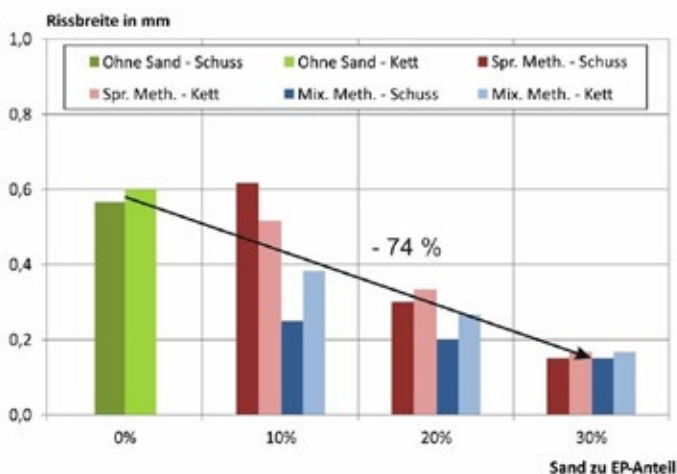
In einer dritten Versuchsreihe wird das Tragverbundverhalten des Textilgeleges einschließlich der Querrovings untersucht. Hierfür wird das unmodifizierte sowie das modifizierte Gelege in Dehnkörpern aus Feinbeton eingearbeitet. In einem ersten Schritt werden mehrere unterschiedliche Untersuchungen durchgeführt um die bestmögliche Lasteinleitung der Prüflast in den Probekörper zu ermitteln. Schlussendlich wird eine Klemmvorrichtung eingesetzt, die bereits im Rahmen anderer Versuche des Instituts für Bauforschung verwendet wurden. Die durchgeführten Untersuchungen sollen neue Aufschlüsse über das Tragverbundverhalten der modifizierten Textilien liefern.

In der Tat wird im Rahmen der Versuchsreihe eine Verbesserung im Hinblick auf die Rissbildung nachgewiesen. Mit zunehmendem Modifikationsgrad steigt die Rissanzahl um bis zu 150% an und die Rissbreite mindert sich um bis zu 74%. Im Allgemeinen ist eine geringere Rissbreite vorteilhafter für die Dauerhaftigkeit eines sanierten Stahlbetonbauteils da gegebenenfalls der schädigende Wasser- bzw Feuchteintritt stark abgesenkt oder bestenfalls sogar komplett unterbunden werden kann. Obwohl das textile Bewehrungsmaterial unempfindlich gegenüber einem Wassereintritt reagiert, ist immerhin das Altbetonbauwerk vor einer fortschreitenden korrosiven Schädigung zu schützen.





\_Haftzugversuch; Links: Versuchsaufbau; Rechts: Bruchfläche eines Haftzugkörpers



\_Einfluss der Oberflächenmodifikation auf die Rissbreitenveränderung



### \_Haftzugversuche

In Haftzugversuchen wird abschließend das Verbundverhalten senkrecht zur Textilebene untersucht. In der Regel werden bei getränkten textilen Faserbündel in Querrichtung keine, oder sehr wenige, Kräfte übertragen /Ort07/. Jedoch wird in diesem Fall eine geringfügige Verbundsteigerung durch die Oberflächenmodifikation und somit dem Vorhandensein einer raueren und griffigeren Oberfläche hervorgerufen. Zudem wird, wie bereits in einigen vorangegangenen Versuchsreihen, das bessere Verbundverhalten der Sand Sprinkled Method gegenüber der Sand Mixed in Epoxid Method bestätigt.

### Zusammenfassung

Allgemein wird festgehalten, dass die Oberflächenmodifikation einen erhöhten Einfluss auf das Verbundverhalten des getränkten Textils zur Betonmatrix aufweist. Hierbei gilt, je höher der Sandanteil umso höher die Verbundwirkung, dies zumindest bis zu einem Sandanteil von 30 M.% des eingesetzten Tränkungs polymers. Zudem hebt sich die, in drei von vier Versuchsreihen untersuchte, Sand Sprinkled Method als die Tränkungsvariante hervor, die ein besseres Verbundvermögen zu bieten hat, dies liegt an dem besseren Kontakt zwischen dem Sandpartikel und der umgebenden Betonmatrix.

### Quellenverzeichnis

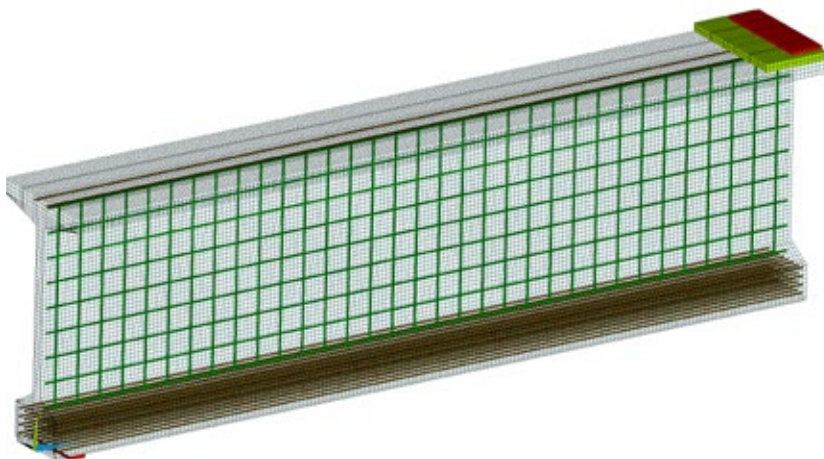
- /Eh12/: Ehlig, D.: Vom Pavillon bis zum Versammlungsraum: Gebäude aus dünnen, frei geformten Fertigteilen. In: 4. Anwendertagung Textilbeton, Dresden,
- /Jes10/: Jesse, F.; Curbach, M.: Verstärken mit Textilbeton. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg): Beton-Kalender, Teil 1. Ernst & Sohn, Berlin, ISBN 978-3-433-02931-2, 2010
- /Ort07/: Ortlepp, R.: Untersuchungen zur Verbundverankerung textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschichten für Betonbauteile, TU Dresden, Dissertation, 2007
- /SGL15/: SGL Group, The Carbon Company, Technisches Merkblatt SIGRAFIL® C Carbonfasern auf Basis von PAN, 2015



Prix d'excellence 2016 mention bien

# QUERKRAFTTRAGVERHALTEN VON VORGESPANNTEN UHPFRC TRÄGERN MIT UND OHNE QUERKRAFTBEWEHRUNG

Michel Bichler M.Sc.



\_Abb. 1: Simulationsmodell des Brückenträgers in ANSYS 15.0

Die Vorteile von Ultra-Hochfestem Beton gegenüber der konventionellen Ausführung sind bekannt. Der neuartige Baustoff steht jedoch erst in den Startlöchern. Viele Fragestellungen sind noch aufzuklären, wodurch an der TU München mehrere Forschungsprojekte laufen. In meiner Masterarbeit wurden eine Reihe von Voruntersuchungen durchgeführt, die das Tragverhalten der UHPFRC-Träger mithilfe von Simulationen analysieren sollten.

Ultra-Hochfester Beton ist ein neuartiger Baustoff der sich erst in der Entwicklungsphase befindet. Dabei unterscheidet er sich gegenüber Normalbeton durch eine gezielte Reduktion des Porenraums im Gefüge, wodurch Druckfestigkeiten bis zu 200MPa möglich werden und gleichzeitig die Dauerhaftigkeit des Materials stark verbessert wird. Durch die Beimischung von Stahlfasern lässt sich die Nachrisszugfestigkeit des Betons erhöhen, wodurch die Duktilität verbessert wird. Die verbesserten Materialeigenschaften erlauben das Konstruieren von filigranen und nachhaltigen Bauwerken aus Beton, bei denen das Eigengewicht gegenüber Normalbeton um 30 bis 50% reduziert werden kann. Durch das günstige Verhältnis von Druckfestigkeit zu Eigengewicht ist der neuartige Baustoff für den Einsatz im Brückenbau prädestiniert. Am Lehrstuhl für Massivbau der TU München wird zurzeit die Entwicklung von Fertigteilbrückenträger aus faserverstärkten Ultra-Hochfestem Beton vorangetrieben, welche unter anderem für die Errichtung

einer Pilotbrücke in Rumänien verwendet werden sollen. Das Querkrafttragverhalten von Trägern aus Beton bleibt nach wie vor ein großes Thema in der Forschung. Durch die Verwendung von UHPFRC (Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete) entstehen unter anderem durch das Vorhandensein von Stahlfasern im Gefüge zusätzliche Besonderheiten und Fragestellungen zu Normalbeton hinsichtlich der Bemessung, welche durch fortführende Forschungsprojekte weiter untersucht werden müssen. Um das Tragverhalten der zukünftigen Brückenträger zu analysieren und dadurch den Wissensstand voranzutreiben sollen experimentelle Versuche in der Prüfhalle des Instituts durchgeführt werden.

Die abgelegte Masterarbeit befasste sich mit der Durchführung von Voruntersuchungen mithilfe von numerischen Simulationen, bei denen die später zur erwarteten Tragmechanismen und Bruchlasten analysiert werden sollten. Dabei wurde das Hauptaugenmerk auf Maßstabeffekte durch unterschiedliche Trägerhöhen sowie der Einfluss der Querkraftbewehrung und Vorspanngrad auf das Tragverhalten der Brückenträger gelegt.

In einem ersten Schritt wurde mithilfe des Simulationswerkzeuges ANSYS 15.0 ein Basismodell für die Abbildung von vorgespannten Doppel-T-Trägern erstellt. Dabei wurden eine ganze Reihe von variablen Parametern in das Modell einprogrammiert, die ein leichtes Abstimmen des Modells für die Wiedergabe unterschiedlicher Trägersysteme ermöglichen. In einem nächsten Schritt wurde das entwickelte Trägermodell validiert, indem ausgewählte Versuche für Träger aus Ultra-Hochfestem Beton zur Bewertung der Querkrafttragfähigkeit aus der Literatur nachgerechnet wurden. Mithilfe der Software wurde das Tragverhalten eines Doppel-T-Trägers bis zum Bruch simuliert und durch das Abgleichen der Last-Verformungskurven die Übereinstimmung des Modells mit der Realität bewertet. Dabei konnte eine identische Trägersteifigkeit und Bruchlast festgestellt werden. Zusätzlich wurden die Rissbilder aus Simulation mit denen aus der Realität verglichen, wodurch auch in diesem Punkt eine große Korrespondenz herbeigeführt werden konnte.

Nach Abschluss der Modellbewertung wurden die Voruntersuchungen für die Durchführung der geplanten Trägerversuche ausgearbeitet. Zum einen galt es,

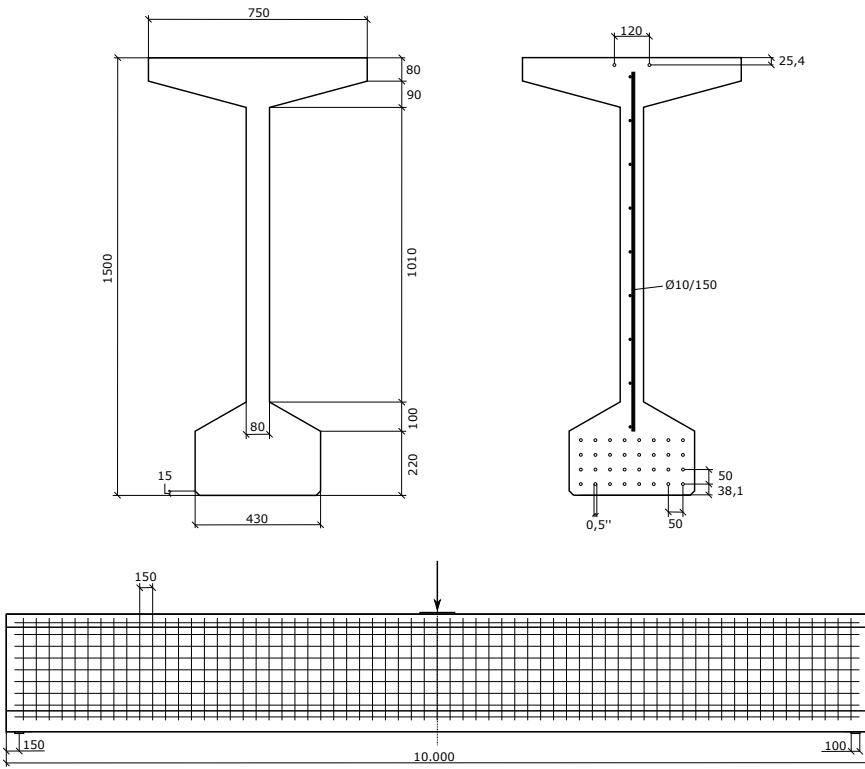


Abb. 2: Abmessungen des Brückenträgers aus UHPFRC

eine optimale Dimensionierung der unterschiedlich großen Träger zu konzipieren, damit sich bei Belastung ein Versagen infolge Schubzugbruch einstellt. Des Weiteren sollte mithilfe einer Parameterstudie das Querkrafttragverhalten durch das Variieren verschiedener Einflüsse untersucht werden. Dabei wurden unter anderem die Einflüsse des Stahlfasergehalts in der Betonrezeptur sowie die Auswirkungen einer Querkraftbewehrung aus schlaffem Stabstahl mit unterschiedlichem Durchmesser auf das Tragverhalten analysiert.

Für den Einfluss des Vorspanngrades konnte beispielsweise festgestellt werden, dass dieser das Tragverhalten bei geringen Belastungen kaum verändert. Der Zeitpunkt des Übergangs vom ungerissenen in den gerissenen Zustand, bei dem es zu einem Abfall der Steifigkeit im Träger kommt, wird jedoch mit Zunahme des Vorspanngrades nach hinten verschoben, da die Zugfestigkeit des Betons erst zu einem späteren Zeitpunkt überschritten wird. Die Bruchlasten hingegen ändern sich nur geringfügig. Da die Träger planmäßig infolge der Querkraft versagten, konnte die Erkenntnis bestätigt werden, dass der Vorspanngrad die Querkrafttragfähigkeit des Trägers nur minimal beeinflusst.

In einem letzten Schritt sollten die Versuchsträger zu Brückenträger weiterentwickelt werden. Dabei sollten die Brückenträger für das Erreichen einer ähnlichen Tragfähigkeit und Steifigkeit im Vergleich zu den Brücken in konventioneller Bauweise dimensioniert werden. In einem ersten Schritt ist das Tragverhalten eines konventionellen Brückenträgers nachgerechnet worden. In einem nächsten Schritt wurde dann das Tragverhalten des hochfesten Trägers bei Verwendung unterschiedlicher Längsbewehrungs- und Vorspanngrade sowie Betongütern analysiert.

Durch die Vorteile des hochfesten Betons konnte die Stegbreite des Brückenträgers aus UHPFRC stark dezimiert werden, wodurch sich für das Erreichen einer gleichen Bruchlast der Materialverbrauch gegenüber konventioneller Ausführung um 37% reduziert.

Mithilfe dieser Arbeit konnten wichtige Analysen in Hinblick auf das Tragverhalten von Brückenträger aus hochfestem Beton durchgeführt werden, welche die Richtung für weitere Untersuchungen in experimenteller Form vorgeben. Die Vorteile des neuen Baustoffs

Spannkrafteinleitung und Querkraftversuche an Spannbetonträgern

Spannbetonträger T25

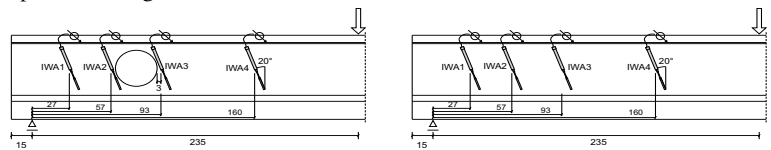


Bild C 25.1: Lage der Wegaufnehmer am Steg bei T25a und T25b

Tabelle C 25.1: Baustoffprüfungen und Vorspannung

	$f_{ct,fl}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$f_{c,cube100}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Vorspannung [kN]	$\epsilon_p$ [‰]
12.10.2010 Spannbett	-	-	-	2250/2250*	6,75
15.10.2010 Ablassen 3 Tage	20,9	103	40300	1927/1950*	5,78/5,85*
09.11.2010 1.TV 29 Tage	24,9	172	48700	1713	5,14
10.11.2010 2.TV 30 Tage	23,7	169	47900	1813	5,44

Tabelle C 25.2: Versuchsparameter und Bruchquerkräfte

UHPFC	Öffnungen*		Bruchquerkraft [kN]		Rissquerkraft [kN]	
	a/d	Öffnungen*	TV a	TV b	TV a	TV b
M1	3,8	0,32/ -	344	465	150	454

\* erste und zweite Trägerseite

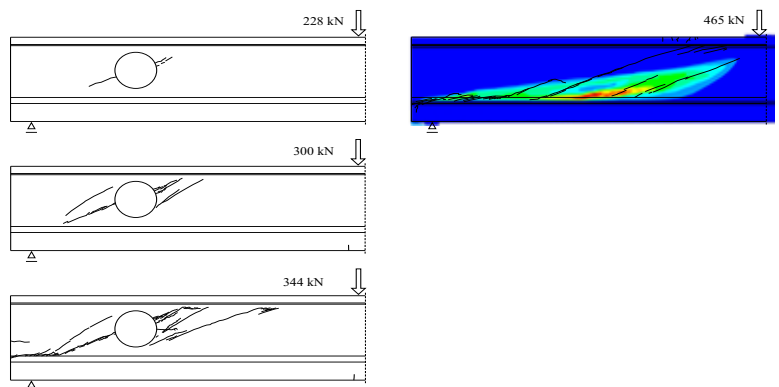


Bild C 25.2: Rissbilder bei T25a und T25b

C58

Abb. 3: Gegenüberstellung der Rissbilder in Realität und Simulation

konnten klar wiedergegeben werden. Somit ist es nur eine Frage von Zeit bis dass sich der Ultra-Hochfeste Beton im Ingenieurbau durchsetzt und zu einem festen Bestandteil des Bauwesens wird.

Prix d'excellence 2016 mention bien

# REAL ESTATE BUBBLES\_

Gilles Cosyn

If housing prices are at exuberant high levels largely sustained by overly optimistic future appreciation expectations, we speak of what is called a real estate bubble or a housing bubble.

In many regions, an acceleration in real estate prices over the past several decades has raised concerns about the existence of a speculative bubble in the housing market. If true, home prices could be susceptible to a steep decline which could have a severe impact to the broader economy.

Examples of asset bubbles include the Dutch tulip mania in the 1630s, the South Sea bubble of 1719–1720 and more recently the housing bubble in the United States of 2006–2008.

Standard neoclassical theory and the efficient market hypothesis imply the absence of bubbles. However, recent research suggests that speculative bubbles occur and can persist over many years.

The main macroeconomic factors driving asset prices and creating potential speculative bubbles in the housing market are income, interest rates, zoning laws, taxes, demographic changes and monetary policy.

Most of the literature indicates that income is one of the most important fundamental factors in explaining house prices. In general, if the average income level rises, the price of real estate increases too.

Furthermore, zoning laws and restrictions are an important factor in housing price levels. Areas with strict zoning policies strongly correlate with high housing prices. The government regulation therefore has an important influence on housing affordability by changing its zoning restrictions or by applying a different zoning tax. Some research suggests that changes in housing-supply regulations may be one of the most important factors for the rise and fall of the housing market.

Asset prices are not only influenced by the classical macroeconomic factors but also by psychological factors such as expectations, biased judgement and the spread of news. People make their decisions based on heuristics to reduce the complexity of assessing a task. Although quite useful, these heuristics often lead to serious biases and systematic errors. For instance, there is the representativeness heuristic, in which probabilities are evaluated by the degree of ease to which certain effects or information are available. This leads to well-known

problems like the gambler's fallacy, an insensitivity to simple statistical judgments even among experts and an illusion of validity or a serious amount of overconfidence in one's own judgment.

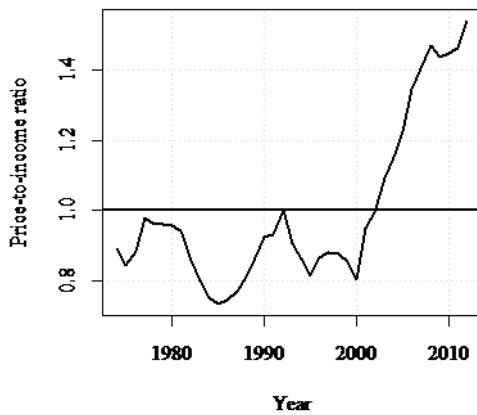
In order to claim evidence for a bubble, two widely supported measures are the price-to-rent ratio and the price-to-income ratio.

By assuming that there is a long-term equilibrium between household income and real estate prices, the price-to-income ratio serves as an indicator for home ownership affordability. If the ratio is relatively high, then households are faced with higher ownership costs like higher mortgage debt payments. The probability of households having difficulties to afford a home increases, which should lower housing demand and therefore lead to a downward pressure on prices.

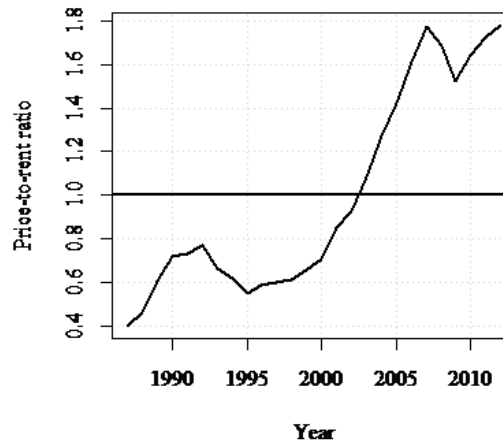
The price relative to the rent is another common way to support evidence for a bubble. A common way to do this is by comparing the implicit rent that homeowners receive from owning their home to the price. The implicit rent, often also called the owner's equivalent rent, is defined as the rent that would be paid if the homeowner were to rent the same home or the rent that could be received if the same home would be rented to another tenant. As such, the concept of implicit rent is the return to the homeowner from owning his home, much like a dividend is the return from owning shares in a company. The often referred dividend-to-price ratio for corporate equities can thus be compared to the price-to-rent ratio. A high price-to-rent ratio suggests that prices have increased relative to rents in the past and that investors could expect a higher return if investing in other assets. Thus, a high ratio is not likely to remain at such a high level and either prices have to fall or rent payments have to increase.

There are two ways of calculating these two ratios. One way is to divide the annual average price by the annual average income or rent. These annual ratios are then compared to their historical average or to data from other countries or regions. Another way is to divide the price index by the rent or income index.

The price-to-income ratio for Luxembourg shown in Figure 1 varies considerably over the period from 1974 until 2012. In the 38 years that were observed, mean property prices have increased by a factor of 15 while

**Price-to-Income Ratio in Luxembourg 1974-2012**

\_Fig. 1: Price-to-income ratio in Luxembourg, 1974–2012

**Price-to-Rent Ratio in Luxembourg 1987-2012**

\_Fig. 2: Price-to-rent ratio in Luxembourg, 1987–2012

disposable income rose by a factor of 9. After the year 2000, the ratio shows an important upwards trend. From a total of 38 years, only the last 10 years are above their long-run equilibrium. In 2012, the last year for which the data was available, the price-to-income ratio arrived at its peak, being about 50% above its own long-run average.

Figure 2 shows the price-to-rent ratio in Luxembourg from 1987 until 2012. The ratio has risen from 0.4 in 1987 to 1.8 in 2012, in other words an increase of 138% over 25 years. The downward trends in the price-to-rent ratio from 1992 until 1995 and from 2007 until 2009 are caused by price decreases in the house price index. While renting prices showed a continuous upwards trend, the overall rise of the ratio can be explained by a disproportional increase of buying prices compared to renting prices.

As mentioned earlier, real estate prices are also driven by zoning restrictions, i.e., land prices. Prices of building land in rural areas tend to be quite stable and keep pace with the inflation while the shortage of enough building space in cities drives land prices up beyond inflation.

Luxembourg has an abundance of farm land that could easily be transformed into building zones. Only a fraction of the available land is used for habitation. There is no lack of building land outside urban areas but zoning restrictions in Luxembourg do not keep pace with the demand.

In Luxembourg, the prices of building land are exceptionally high from a historical perspective as well as from an international comparison. Prices of building plots increased by 300% from 1974 until 2002 in real terms while residential prices only increased by 150% in the same period. In 1992, one square meter of building land in Luxembourg cost on average 56€, while in 2002 it was already about 152€. In 2014 the average price of building land in Luxembourg was a whopping 594€ per square meter being 10 times as expensive as 22 years before. That being said, building land in the country of Luxembourg is on average nearly as expensive as land in Brussels, amounting to 618€ per square meter, and nearly six times the average price of building land in Belgium, costing 117€ per square meter. There is not a lot of research focusing on real estate markets in Luxembourg even though price increases in the past were quite

significant. The mean house price index in Luxembourg increased by 1500% over the last 30 years. Building land prices in Luxembourg increased tenfold between 1992 and 2014. Furthermore, the price-to-income and the price-to-rent ratio indicate that prices, compared to disposable income per capita and rent, are well above their historical average. In 2012, the price-to-income ratio in Luxembourg was about 50% above its own long-run average while the price-to-rent ratio was about 80% above average.

Nevertheless, the results in support for a housing bubble in Luxembourg are not evident. The steep increase in a lot of metrics for the Luxembourgish housing market gives evidence in support of a higher overvaluation of real estate prices. It is difficult to say by how much the Luxembourgish housing market is overvalued but a steep decline in housing prices seems possible if interest rates suddenly increase or if a change in the zoning regulation inflates the offer of building land. A nationwide decrease in the housing value would have a considerable impact on the local economy.



Wasserbauwerke aus Beton unterliegen besonderen last- und umweltbedingten Beanspruchungen. Speziell die mechanische Einwirkung infolge der in der Wasserströmung mitgeführten Feststoffe (Geschiebegut) stellt eine der maßgebenden dauerhaftigkeitsrelevanten Beanspruchungen bei wasserbaulichen Anlagen dar. Man spricht von Hydroabrasionsverschleiß.



Prix d'excellence 2016 mention bien

## EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR BEURTEILUNG DES HYDROABRASIONSVERSCHLEISSES VON BETON AM BEISPIEL EINES WASSERKRAFTWERKS IN VIETNAM\_

Tock Françoise

Aufgrund von Hydroabrasionsverschleiß unterliegt das Wasserkraftwerk im Norden Vietnams starken Schäden. Ziel dieser Masterarbeit ist es einen Sanierungsbeton mit Vietnamausgangsstoffen zu entwickeln der möglichst verschleißresistent ist um die Energieversorgung der Menschen wieder zu gewährleisten. Bei den experimentellen Untersuchungen wurden ebenfalls die maßgebenden Betoneigenschaften für Verschleißfestigkeit untersucht. Der Kenntnisstand in Bezug auf die bedeutenden Kenngrößen für Hydroabrasionsverschleiß ist noch lückenhaft und die wirklichkeitsnahe Simulation gestaltet sich als schwierig.

Zur Nachahmung der hydroabrasiven Beanspruchung bei wasserbaulichen Anlagen, wurde am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie des Karlsruher Instituts für Technologie eine Verschleißprüfvorrichtung entwickelt, welche im Wesentlichen aus einem Stahlzylinder mit innen liegender Welle mit Getriebemotorantrieb besteht (Verschleißtrommel nach Bania). In der Trommel befinden sich 18 (3x6) Haltevorrichtungen zum Fixieren der Probekörper und 24 Stahlpaddel zur optimalen Durchmischung des Geschiebe-Wasser Gemischs.

Mit Hilfe dieser Prüfvorrichtung wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt (Umdrehungsgeschwindigkeit 50U/min) um herauszufinden welche Betonmischungen am verschleißresistentesten sind, dabei wird eine schleifende und prallende Beanspruchung simuliert (1-2.5m/s). Die Trommel wird zu 14V% mit Wasser und Geschiebe in einem Mengenverhältnis von 1:1 befüllt. Eine Versuchsdauer beträgt 22h. In zwei Versuchsreihen wurden, unter Verwendung von Vietnam- (Kalkstein Härte 3) und Karlsruher- (Quarz Härte 7) Geschiebegut in der Trommel, unterschiedliche Vietnammischungen (V1-V5) mit einem Referenzbeton (R), bestehend aus Karlsruher Ausgangsstoffen, verglichen (Tabelle 1).

Pro Mischung wurde für die Verschleißversuche, sowie zur Bestimmung von Frisch und Festbetoneigenschaften jeweils 50L Beton gemischt um 13 Probekörper herzustellen, davon wurden 6 für die Verschleißversuche verwendet. Aus den Ergebnissen (Tabelle 2) geht hervor, dass unabhängig vom benutzten Geschiebegut in der Trommel, der Vietnambeton (V1-V5) einen höheren Verschleiß aufweist (Masseverlust doppelt so groß) als die Karlsruher Zusammensetzung (R). Um hervorzuheben welche Eigenschaften vom Beton den Verschleiß beeinflussen wurden zudem verschiedene Festbetoneigenschaften wie Druckfestigkeit und statischer

Mischung	Zementgehalt [kg]	Wassergehalt [kg]	Sand [kg]	Splitt [kg]	Schotter [kg]
V1 Original	14,75 Chinfon	8,25	40,34	0	56,68
V2 Optimierter	14,75 Chinfon	8,25	19,92	21,53	55,98
V3 Reduzierter Sandgehalt	14,75 Tuyen Quang	8,25	11	31	55,98
V4 Original	14,75 Tuyen Quang	8,25	40,34	0	56,68
V5 Optimiert	14,75 Tuyen Quang	8,25	19,92	21,53	55,98
R Referenz	16,8 Institutszement	9,4	29,25	34,75	26,55

\_Tab.1: Mischungsentwürfe für die experimentellen Untersuchungen

Probekörper	Masseverlust [M%]
Karlsruher Geschiebegut	
V1	41,44
V2	45,31
V3	46,76
V4	45,97
V5	46,95
R	22,35
Vietnam-Geschiebegut	
R	4,621
V1	11,513
V4	13,720

\_Tab. 2: Ergebnisse der Masseverluste mit Vietnam und Karlsruher Geschiebegut nach 22h Prüfung in der Verschleißtrommel

E-modul, sowie Frischbetoneigenschaften, zum Beispiel das Verdichtungsmaß, experimentell geprüft und in einer Widerstandsmatrix zusammengefasst. Diese Matrix zeigt Tendenzen der Verschleißfestigkeit in Bezug auf die einzelnen Eigenschaften, sowie die Bewertung der verschiedenen getesteten Mischungen (Tabelle 1).

Es wird deutlich, dass je kleiner die Druckfestigkeit, d.h. die Widerstandsfähigkeit vom Beton beim Einwirken von Druckkräften, umso größer der Verschleiß. Dies gilt allerdings nicht innerhalb gleicher Druckfestigkeitsklassen, welche zu unterschiedlichen Masseverlusten führen können (V1 und V2).

Tendenziell führt ein geringerer statischer E-modul, charakterisierend für das Verhältnis zwischen Druckspannungsdifferenz und elastischen Verformung, zu einem geringeren Masseverlust. Mit steigendem Verdichtungsmaß kann es zu einem erhöhten Masseverlust kommen. Der Wert des Verdichtungsmaßes sollte möglichst klein sein damit der Beton eine gute Verarbeitbarkeit erhält.

<b>Betonzusammensetzung</b>	<b>Mischungsbewertung steigender Verschleiß</b>
↘ Gesteinskorn	V1/V4-V2/V5-V3
↘ Sandgehalt	R
↘ Sandarm	V1/V4-V2/V5-V3
↘ Splittgehalt	V5/V2/V3-V1/V4
↘ Schottergehalt	V1/V4-V2/V5-V3
↘ Sieblinie grobkörnig	R-V1/V4-V2/V5-V3
↘ Härte	R
↘ Anpassung an Regelseibline A	V1, V2, V3
Zement	V4, V5
⊕ Chinfon	R
⊖ Tuyen Quang	V1=V2=V3=V4=V5
⊕ Portlandzement	=R=0,56
Wasser	
↘ w/z-Wert	
<b>Frischbetoneigenschaften</b>	
↘ Verarbeitbarkeit	R-V4-V5/V2-V3-V1
↘ Verdichtungsmaß	R-V4-V5/V2-V3-V1
<b>Festbetoneigenschaften</b>	
↘ Höchstlast	R-V2-V1-V3-V5-V4
↘ Druckfestigkeit	R-V2-V1-V3-V5-V4
↘ E-Modul	V4-R-V1-V3-V2-V5
<b>Verschleißfesteste Mischung</b>	R-V1-V2-V4-V3-V5

\_Matrix der untersuchten Parameter auf der Widerstandsseite



\_Verschleißfesteste Vietnammischung V1 links nach 22h Prüfung mit Karlsruher rechts Vietnam Geschiebegut

Ein weicherer Beton, wie der Referenzbeton, ist bei einer prallenden Beanspruchung einzusetzen, während ein steiferer Beton, wie der Vietnambeton, bei schleifendem Verschleiß geeigneter ist.

Die Betonzusammensetzung an sich spielt ebenso eine Rolle und beeinflusst die Festbetoneigenschaften. Die Härte der Gesteinskörnung und der Zementsteinmatrix beeinflusst den Abrasionswiderstand des Betons. Der Zementgehalt sollte somit reduziert werden um einen verschleißresistenten Beton zu erstellen. Aus dem Vergleich unterschiedlicher Zementarten für Vietnambeton wird deutlich, dass der Chinfon Zement (V1) bessere Eigenschaften aufweist als der Tuyen Quang Zement (V4). In der Regel, steigt mit steigendem w/z Wert auch der Hydroabrasionsverschleiß. Dies gilt allerdings nicht immer in den durchgeführten Versuchen z.B. erzeugt ein w/z Wert von 0.56 sowohl verschleißfeste als auch verschleißunresistente Betone. Allgemein führt ein geringer Sandgehalt zu einem größeren Masseverlust jedoch trifft dies nicht auf Vietnambetone zu bei dem die verschleißresistenteste Mischung V1 den größten Sandgehalt aufweist. Dies erklärt sich dadurch, dass bei den Vietnammischungen der Sand bessere Eigenschaften (Härte 7) als der Schotter (Härte 3) besitzt.

Ein verschleißresistenter Beton ergibt sich letztendlich nur aus dem Zusammenspiel der einzelnen Parameter wie die Zementeigenschaften (Art, Härte, Druckfestigkeit,...) als auch die Gesteinskorneigenschaften (Gestalt, Größe, Härte,...).

Zudem beeinflussen die Parameter auf der Einwirkungsseite die Stärke des Verschleißes deutlich, wie die stark unterschiedlichen Masseverluste (Tabelle 2) von den Versuchen mit Karlsruher bzw. Vietnamverschleißgeschiebe in der Trommel zeigen. Die erstellte Matrix der Einwirkungsparameter zeigt, dass die Härte, Art, Form, Größe, Grobheit und Anzahl des Verschleißgeschiebes welches im Fluss mitgetragen wird, das Ausmaß des Verschleißes erheblich beeinflusst. Die Fließgeschwindigkeit mit der das Geschiebe auf das Bauwerk aufprallt spielt ebenfalls eine große Rolle, da sie charakteristisch für die Art der Beanspruchung ist.

Diese experimentellen Ergebnisse machen deutlich, dass die Vietnamausgangsstoffe nicht die gleichen Eigenschaften haben wie die aus Karlsruhe. Die in der Norm (DIN 1045-2) vorgegebenen Werte

um verschleißfesten Beton herzustellen führen nicht zwingend zur Verschleißresistenz. Eigenschaften für verschleißresistente Betone können nicht für Betone mit Ausgangsstoffen jeglicher Herkunft übernommen werden. Bei Betonmischungen, zusammengesetzt aus Karlsruher Ausgangsstoffen ist ein sandarmer Beton ein verschleißresistenterer Beton, jedoch nicht aus Vietnam Ausgangsstoffen.

Es ergibt sich, dass die V1 Mischung mit einem Masseverlust von 11.5% die verschleißresistenteste Mischung aus Vietnamausgangsstoffen ist und somit verwendet werden kann um die Sanierungsmaßnahmen an dem Wasserkraftwerk in Vietnam auszuführen. Jedoch bleibt es weiterhin eine Herausforderung einen verschleißresistenten Beton mit einem Masseverlust von weniger als 10% aus Vietnamausgangsstoffen herzustellen.

Die aufgestellte Matrix und die Versuche zeigen, dass die Optimierung der Betonzusammensetzung die Verschleißwiderstandsfähigkeit steigert. Nur das Zusammenspiel der einzelnen Parameter gewährleistet eine erhöhte Verschleißfestigkeit. In Zukunft sollen weitere Forschungen durchgeführt werden um einen eindeutigen Verschleiß bestimmenden Parameter zu entwickeln. Während den experimentellen Untersuchungen an der Verschleißtrommel wurden Verbesserungsvorschläge für die Ausführung der Versuche entwickelt und die Abrasionstrommel wurde in einigen Aspekten optimiert. Die Ergebnisse der Masterarbeit haben belegt, dass die Karlsruher Verschleißtrommel ein geeignetes Prüfverfahren ist um Hydroabrasionsverschleiß nachzuahmen und sind grundlegend für die Ermittlung geeigneter Betonmischungen die dem Hydroabrasionsverschleiß bei Wasserbauwerken standhalten. Weitere Forschungen an der Abrasionstrommel sollen dazu führen diese in die wasserbaulichen Regelwerke einzuführen.

Der Stromertrag von PV-, Windenergie- und KWK-Anlagen wird bisher in vielen EU-Ländern auf der Basis einer einfachen Monats- bzw. Jahresbilanz im Energiepass berücksichtigt. Dies führt meist zu einer deutlichen Überschätzung des Einflusses der Eigenstromnutzung in einem konkreten Gebäude. Im Rahmen der nZEB-Definition soll zukünftig nur noch der selbst erzeugte Strom, der im Gebäude selbst genutzt werden kann, im Energiepass angerechnet werden.

Prix d'excellence 2017 mention excellent

# ENTWICKLUNG EINER BILANZMETHODE ZUR BESTIMMUNG DER EIGENSTROMNUTZUNG AUS PV, WEA UND KWK-ANLAGEN IN NICHTWOHNGBÄUDEN

Christophe Armbrorst

## Einleitung

Bei der Planung energieeffizienter Gebäude nimmt, neben einer guten thermischen Qualität der Gebäudehülle und einer darauf abgestimmten und optimierten Anlagentechnik, auch die Integration von erneuerbarer Energien einen immer größeren Stellenwert ein. Dies wird auch seitens der EU im Rahmen der Zielsetzung bezüglich der nearly zero-energy buildings (nZEB) gefordert.

Der Stromertrag von Photovoltaikanlagen (PV), Windenergieanlagen (WEA) und Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wird bisher in vielen Europäischen Ländern auf der Basis einer einfachen Monats- bzw. Jahresbilanz im Energiepass berücksichtigt. Dies führt meist zu einer deutlichen Überschätzung des Einflusses der Eigenstromnutzung in einem konkreten Gebäude und somit zu einer überhöhten Anrechnung der erneuerbaren Energien, sofern der Bilanzbewertungsrahmen der anlagentechnische Energiebedarf des Gebäudes ist.

Für Photovoltaikanlagen in Wohngebäuden wurde deswegen bereits ein neues Monatsverfahren entwickelt, welches in Luxemburg und in der kommenden Version der DIN V 18599-9:2016 in angepasster Form für Wohngebäude übernommen wurde (Lichtmeß 2015). Bei diesem Verfahren wird nur der erzeugte PV-Strom, der im Gebäude selbst genutzt werden kann, im Energiepass angerechnet. Für PV-Anlagen in Nichtwohngebäuden sowie für WEA und KWK-Anlagen in Wohn- und Nichtwohngebäuden existiert bisher noch kein normatives Verfahren zur Bestimmung des selbst genutzten Anteils.

Basierend auf einem vorhandenen Werkzeug und einem methodischen Ansatz wurde in dieser Masterarbeit eine Bilanzmethode weiterentwickelt, die im Rahmen der energetischen Bewertung von Nichtwohngebäuden auf der Basis der Bilanz nach DIN V 18599 herangezogen werden kann, um den in Nichtwohngebäuden selbst genutzten Strom aus Photovoltaik, WEA und KWK-Anlagen abzuschätzen.

## nZEB (nearly zero energy building)

Der Begriff "nearly zero-energy building" (nZEB, dt. Niedrigstenergiegebäude) wurde in der europäischen Richtlinie „Directive 2010/31/EU on energy performance of buildings“ (EPBD) eingeführt. Laut Definition dieser Richtlinie ist ein Niedrigstenergiegebäude „ein Gebäude, das eine sehr hohe [...] Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der fast bei null liegende oder sehr geringe Energiebedarf

sollte zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen - einschließlich Energie aus erneuerbaren Quellen, die am Standort oder in der Nähe erzeugt wird - gedeckt werden“ (EU: European Commission 2010). Den einzelnen Mitgliedsstaaten wird die nationale Umsetzung dieser allgemeinen Definition überlassen. Somit ist jedes Mitgliedsland dazu verpflichtet einen nationalen Plan zu erstellen, in dem die genaue Definition von nZEB-Gebäude festgelegt und ausführlich dokumentiert wird. Dabei sollen „regionale oder lokale Gegebenheiten“ berücksichtigt werden. Die Definition für nZEB-Gebäude ist anhand eines numerischen Indikators für Primärenergieverbrauch in kWh/(m<sup>2</sup>a) zu konkretisieren. Primärenergiefaktoren sowie weitere Berechnungsfaktoren können national festgelegt werden. (EU: European Commission 2010)

Ab dem 1. Januar 2021 sollen in allen Mitgliedsstaaten nur noch Niedrigstenergiegebäude gebaut werden. Öffentliche Gebäude, welche durch Behörden genutzt werden, müssen bereits ab dem 1. Januar 2019 dem nZEB-Standard entsprechen. Außerdem sollen die Mitgliedsstaaten bis dahin Maßnahmen ergreifen, um die Anzahl an Niedrigstenergiegebäuden zu erhöhen. Dazu können finanzielle Anreize geschaffen oder Marktschranken eingeführt werden. (EU: European Commission 2010).

In Luxemburg entspricht die Definition eines nZEB für Wohngebäude im Mittel dem AAA-Standard gemäß dem Luxemburger Energiepasssystem und ist hinsichtlich des Wärmeschutzes dem Passivhausstandard angelehnt. Seit dem 1. Januar 2017 müssen alle Wohngebäude diesem Standard entsprechen. Somit kann Luxemburg als Vorreiter bezeichnet werden, was die Umsetzung der EPBD angeht. (Règlement grand-ducal modifié du 23 juillet 2016 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation).

Für Wohngebäude ist in Luxemburg bereits ein Verfahren zur Berücksichtigung der Eigenstromnutzung von PV-Anlagen etabliert. Auf dieser Methode soll bei der Entwicklung von Bewertungssystemen für Nichtwohngebäude weiter aufgebaut werden.

## Bewertung der bestehenden Verfahren

Die in den meisten EU-Mitgliedsländern angewandte einfache Monats- oder Jahresbilanz führt in der Regel zu einer deutlichen Überschätzung des Eigenstromanteils.

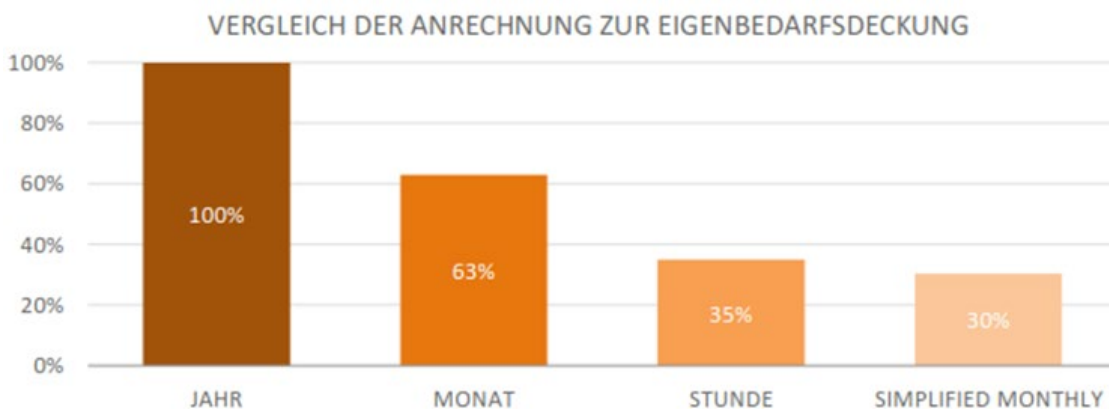


Abb. 1: Vergleich der anrechenbaren Eigenbedarfsdeckungsanteile für unterschiedliche Bilanzzeitschritte für ein Passivhaus der Energieeffizienzklasse AAA (Lichtmeß 2015)

Dadurch werden Gebäude energetisch „besser“ bewertet als sie es in der Realität sind, da in das Netz eingespeister Strom dem Gebäude zugeordnet wird und es ggf. auch zu ungewollten Anrechnungsszenarien führen kann.

In Abbildung 1 wird für ein typisches Passivhaus (Energieeffizienzklasse AAA) der Eigenbedarfsdeckungsanteil der PV-Anlage bei Anwendung verschiedener Bilanzzeiträume und für das Wohngebäudeverfahren nach Lichtmeß (2015) dargestellt. Die Eigenbedarfsdeckung wird mit dem Wohngebäudeverfahren leicht unterschätzt. Verglichen mit einer einfachen Monats- oder gar Jahresbilanz wird der Eigenstromanteil jedoch gut abgeschätzt. Eine Jahresbilanz führt durch den höheren angerechneten Stromanteil zu noch stärkeren Verzerrungen als eine Monatsbilanz.

Im Rahmen der Zielsetzungen der EPBD und der anstehenden NZEB-Definition für Nichtwohngebäude nehmen erneuerbare Energien eine immer wichtigere Rolle ein. Aus oben genannten Gründen ist es deshalb zielführend ein Bilanzverfahren zu nutzen, welches zwischen selbst genutztem und ins Netz eingespeistem Strom unterscheidet.

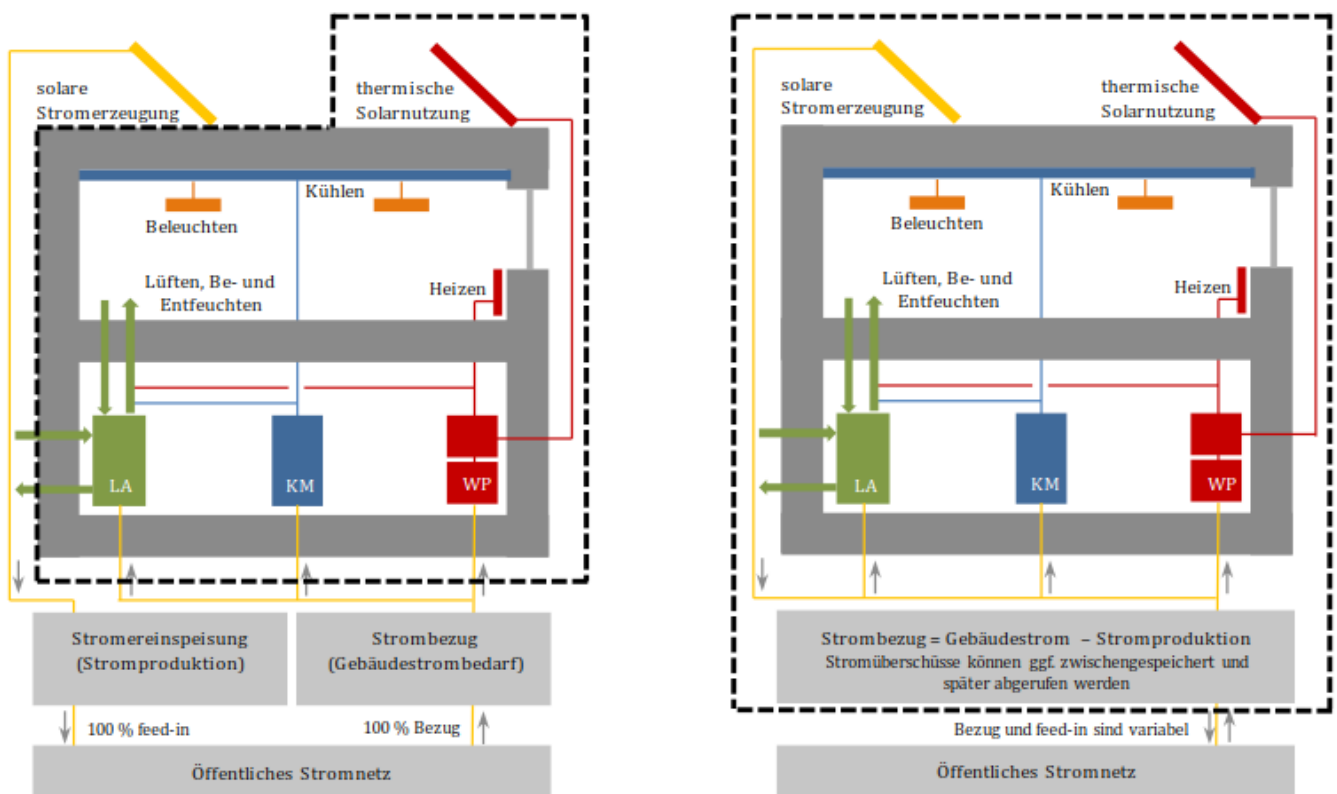
Abbildung 2 zeigt „die aktuelle (linkes Bild) und zukünftig angedachte (rechtes Bild) Berücksichtigung

von gebäudeintegrierter Energieerzeugung am Beispiel einer Photovoltaikanlage in einem Nur-Stromhaus (Nichtwohngebäude). Das linke Bild zeigt die Vorgehensweise bei der aktuellen Bilanzierung für [...] Nichtwohngebäude. Gebäude integrierter produzierter Strom wird vollständig in das Netz eingespeist und es erfolgt keine Eigenstromnutzung. Das rechte Bild zeigt das zukünftige Modell der Bilanzgrenze. Erzeugter Strom wird vorrangig selbst genutzt. Überschüsse werden eingespeist oder ggf. zwischengespeichert.“ (Lichtmeß und Knissel 2013).

#### Methodik

Zur Bestimmung des selbst genutzten Stroms ist die Stromerzeugung aus Photovoltaik, WEA und KWK-Anlagen dem Gebäudestrombedarf, im Fall der Gebäudeeffizienzbewertung über einen Energiepass, resultierend aus den verschiedenen Gewerken (Heizen, Trinkwarmwassererwärmung, Lüften, Kühlen, Beleuchtung und die jeweilige Hilfsenergie), zeitlich gegenüber zu stellen. Da keine brauchbaren Messdaten zum Strombedarf konkreter Gebäude vorliegen, wurde ein vorhandenes Berechnungsmodell weiterentwickelt, das auf der Basis eines stündlichen Bilanzzeitschrittes neben dem Strombedarf auch den Wärmebedarf des Gebäudes einbezieht damit die Laufzeiten einer wärmegeführten KWK-Anlage bestimmt werden können. Auch für die Stromerzeugung aus PV und Windkraftanlagen werden stündliche Jahresprofile erstellt.





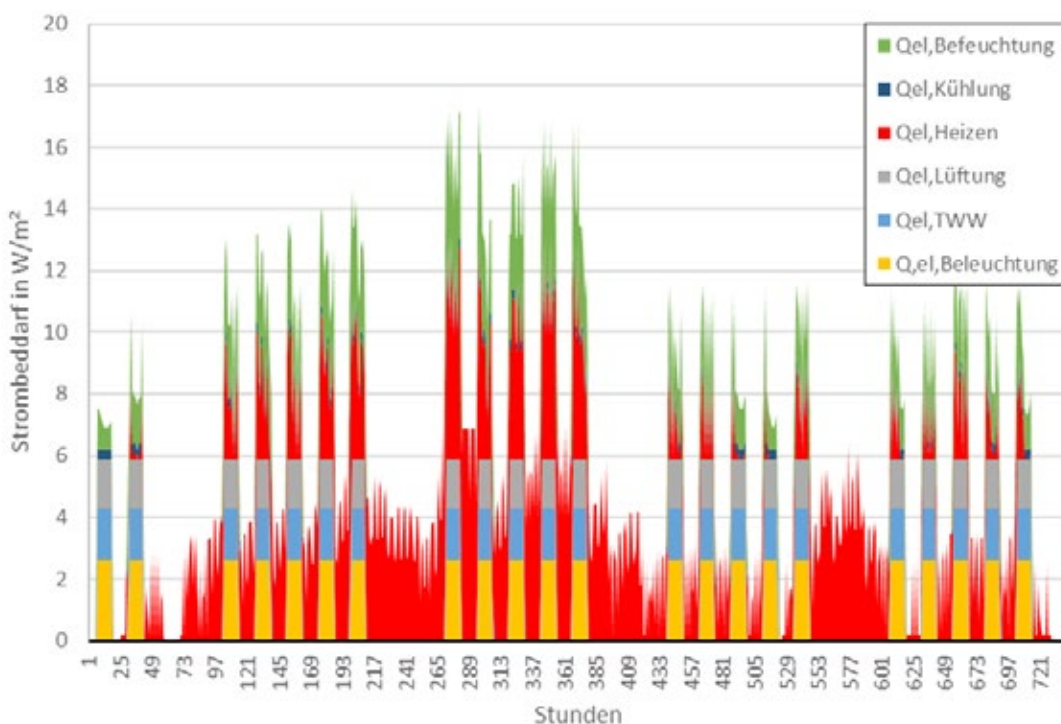
\_Abb. 2: Darstellung der energetischen Bilanzgrenze für Nichtwohngebäude: aktuell (links) und zukünftig angedacht (rechts) (Lichtmeß und Knissel 2013)

Die stündlichen Strombedarfs- und Stromertragsprofile werden anhand stündlicher Wetterdaten und aggregierten Informationen der Energiebilanz nach DIN V 18599 generiert. Das Simulationsmodell kann so für jeden Zeitschritt die Eigenstromnutzung, die Netzeinspeisung und den Netzbezug berechnen.

Mithilfe des stündlichen Simulationsmodells können wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung eines geeigneten monatlichen Verfahrens gewonnen werden. Anhand der Ergebnisse des stündlichen Simulationsmodells werden hierfür zunächst die relevanten Einflussgrößen auf die Eigenstromnutzung bestimmt. In einem weiteren Schritt wird aus den gewonnenen Erkenntnissen

ein Monatsbilanzverfahren für die Berechnung der Eigenstromnutzung von PV-Anlagen, WEA und KWK-Anlagen abgeleitet. Die Anwendbarkeit des entwickelten Monatsverfahrens wird durch Vergleich mit Ergebnissen des stündlichen Simulationsmodells an konkreten Gebäuden überprüft.

Um das stündliche Simulationsmodell und die später daraus abgeleitete Monatsbilanzmethode anhand realer Gebäudedaten validieren zu können, werden 5 konkrete Gebäude in Luxemburg ausgewählt (2 Bürogebäude, 2 Schulen und 1 Altenheim). Um ein möglichst breites Spektrum an Gebäudetypen abzudecken, werden diese Gebäude nicht nur im Originalzustand betrachtet, sondern



\_Abb. 3: Strombedarfsprofil für ein beispielhaftes Bürogebäude im Januar

durch Modifizieren relevanter Gebäudeeigenschaften wird eine Vielzahl an Gebäudevarianten generiert. Neben der Anlagentechnik (s. Abbildung 4) werden auch die Nutzungszeiten (Nutzungszeiten pro Tag und Anzahl der Nutztage im Jahr) und die Dimensionierung der verschiedenen Stromerzeuger (PV, WEA und KWK) variiert.

**Erkenntnisse aus dem stündlichen Simulationsmodell**  
Mithilfe der Ergebnisse aus der stündlichen Jahressimulation können die Haupteinflussparameter auf die Eigenstromnutzung ermittelt werden. Hierfür wird das Simulationsmodell auf eine Vielzahl an Gebäudevarianten angewandt.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das Verhältnis zwischen der erzeugten Strommenge und dem Strombedarf des Gebäudes sowie die zeitliche Übereinstimmung von Stromertrag und -bedarf einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenstromnutzung haben. In Nichtwohngebäuden hängt die zeitliche Verteilung des Strombedarfs maßgebend von den Nutzungszeiten des Gebäudes ab.

Der Einsatz von Wärme- und Kälteerzeuger auf Basis elektrischer Energie (z.B. Wärmepumpen, Kompressionskältemaschinen) führt zu einem höheren Strombedarf, wobei die zeitliche Verteilung des Bedarfs durch klimatische Schwankungen beeinflusst wird. Auf der Stromerzeugerseite hängt die zeitliche Verteilung der

Anlagentechnik	
Gewerk	Auswahl
Raumheizung	Brennwertkessel, verbessert (Gas/Öl)
	Erdreichwärmepumpe
	Holz-/Pelletkessel
	KWK + Gas-Spitzenlastkessel
TWW	zentral (Wärmeerzeuger wie Raumheizung)
	dezentral (elektrischer Durchlauferhitzer)
	nicht vorhanden
Kühlung	Kompressionskältemaschine
	Absorptionskältemaschine
	nicht vorhanden
mechanische Lüftung	Ja
	Nein
Befeuchtung	Ja
	Nein

Abb. 4: Variierte Parameter der Anlagentechnik

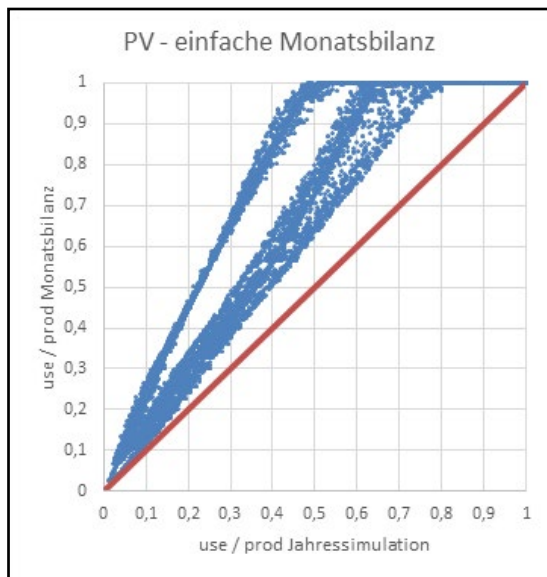


Abb. 5: Anteil der Eigenstromnutzung am gesamten PV-Stromertrag - einfache Monatsbilanz versus stündliche Jahressimulation

Monat	$t_{IG,day}$
Januar	3,5
Februar	6,5
März	8,4
April	10,5
Mai	12,3
Juni	13,2
Juli	13,0
August	11,1
September	9,4
Oktober	6,9
November	4,2
Dezember	2,8

Abb. 6: Anpassungsfaktoren  $t_{IG,day}$  (Règlement grand-ducal modifié du 23 juillet 2016 concernant la performance énergétique des bâtiments d'habitation)

erzeugten Strommenge von PV, WEA und KWK-Anlagen hauptsächlich von klimatischen Schwankungen ab.

### Entwicklung des Monatsbilanzverfahrens für PV-Anlagen

Abbildung 5 stellt für die jährliche Eigenstromnutzung von PV-Anlagen die Ergebnisse einer einfachen Monatsbilanz (derzeitiges Verfahren in den meisten EU-Ländern) und einer stündlichen Jahressimulation gegenüber. Hierfür wurden für die 5 betrachteten Gebäude alle möglichen Kombinationen aus Anlagentechnik und Nutzungszeiten durchsimuliert. Für jede Kombination wurde die Peak-Leistung der PV-Anlagen von 5 bis 500kW variiert. Insgesamt ergeben sich hiermit 11 700 Kombination. Für all diese Gebäude wurde der jährliche Eigenstromanteil (use/prod) jeweils anhand einer einfachen Monatsbilanz und anhand des stündlichen Simulationsmodells berechnet. In Abbildung 5 entspricht jeder einzelne Punkt einem Gebäude. Auf der x-Achse ist der berechnete Wert der stündlichen Jahressimulation und auf der y-Achse das Ergebnis der einfachen Monatsbilanz aufgetragen. Im

Idealfall sollten alle Punkte auf der Winkelhalbierenden liegen. Aus der Graphik geht jedoch hervor, dass die Eigenstromnutzung über eine einfache Monatsbilanz für alle Gebäude deutlich überschätzt wird.

Die Analyse der stündlichen Jahressimulationen hat ergeben, dass die Nutzungszeiten und die zeitliche Verteilung des Strombedarfs einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenstromnutzung haben. Deswegen ist es sinnvoll, die Nutz- und Nichtnutzungszeiten des Gebäudes im Monatsbilanzverfahren separat zu betrachten. Der anhand der DIN V 18599 bestimmte monatliche Gebäudestrombedarf wird hierfür auf die Nutz- und Nichtnutzungszeiten aufgeteilt. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass der gesamte Strombedarf für Beleuchtung, TWW-Bereitstellung, Kühlung, Lüftung und Befeuchtung ausschließlich während der Nutzungszeiten anfällt. Der Strombedarf für die Heizung hingegen wird proportional auf die Nutz- und Nichtnutzzeiten verteilt. Für das Wohngebäudeverfahren nach Lichtmeß (2015) wurde die tageszeitraumabhängige

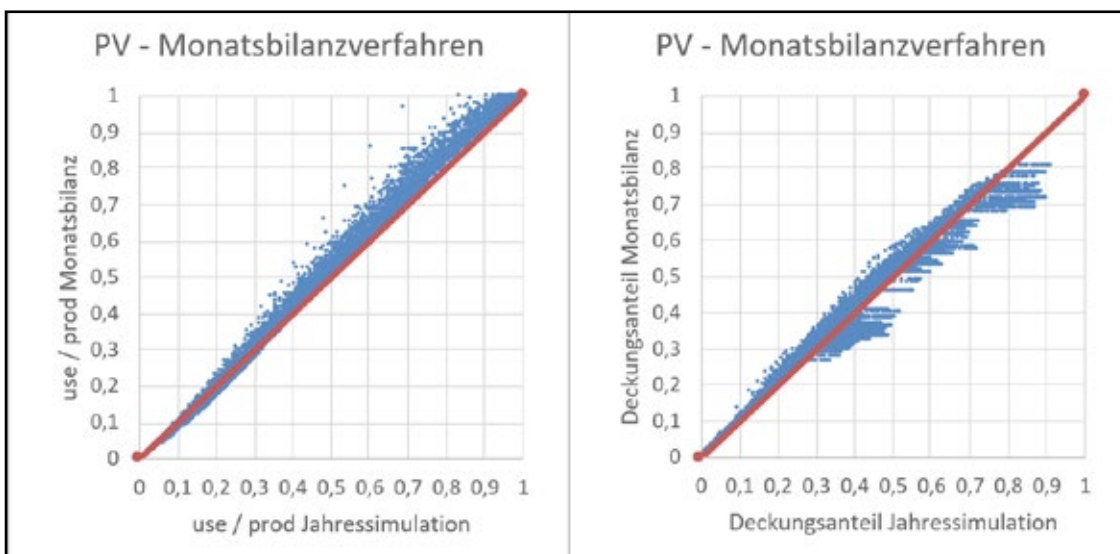


Abb. 7: Anteil der Eigenstromnutzung am gesamten PV-Stromertrag (links) und Deckungsanteil der PV-Anlage am Gebäudestrombedarf (rechts) bestimmt über das Simulationsmodell (x-Achse) und über das entwickelte Monatsbilanzverfahren (y-Achse)

Stromerzeugung von PV-Anlagen untersucht und mithilfe der Anpassungsfaktoren  $t_{IG,day}$  beschrieben. Dieser Ansatz kann auch als Grundlage für Nichtwohngebäude verwendet werden. Die Anpassungsfaktoren  $t_{IG,day}$  drücken für einen bestimmten Monat im Jahr die mittlere tägliche solare Einstrahlungsdauer in Stunden pro Tag aus. Nur der innerhalb des Zeitfensters mit relevanter solarer Einstrahlung  $t_{IG,day}$  anfallende Strombedarf kann durch eine PV-Anlage gedeckt werden. Der Strombedarf im Zeitfenster  $t_{IG,day}$  wird monatlich separat für die Nutz- und die Nichtnutzzeit ermittelt. Hierbei gilt die Annahme einer jeweils gleichmäßigen Verteilung des Strombedarfs während der Nutz- und Nichtnutzzeiten.

Die anhand der DIN V 18599 bestimmte monatliche Stromerzeugung der PV-Anlage muss ebenfalls auf die Nutz- und Nichtnutzzeiten aufgeteilt werden. Hierbei wird von einer gleichmäßigen Verteilung des Stromertrags auf die Nutz- und Nichtnutztage ausgegangen. Die Eigenstromnutzung der PV-Anlage wird für die Nutz- und die Nichtnutzzeiten separat bestimmt. Hierbei

wird die Stromerzeugung der PV-Anlage jeweils dem Strombedarf im Zeitfenster  $t_{IG,day}$  gegenübergestellt, wobei ein Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der klimatischen Schwankungen berücksichtigt wird. Der gesamte anrechenbare Anteil des erzeugten PV-Stroms wird aus der Summe des anrechenbaren Anteils während der Nutzzeiten und des anrechenbaren Anteils außerhalb der Nutzzeiten bestimmt.

In Abbildung 7 werden die Ergebnisse des entwickelten Nichtwohngebäudeverfahrens für die 11 700 Gebäudevarianten dargestellt. Trotz Unschärfen liefert das entwickelte Monatsbilanzverfahren eine deutlich genauere Abschätzung des selbst genutzten Stromanteils als eine einfache Monatsbilanz (s. Abbildung 5).

#### Entwicklung des Monatsbilanzverfahrens für WEA

Analog zum Verfahren für PV-Anlagen wird die Eigenstromnutzung von WEA für die Nutz- und die Nichtnutzzeiten separat bestimmt. Hierbei wird von einer proportionalen Verteilung des WEA-Stromertrags auf die Nutz- und Nichtnutzzeiten ausgegangen. WEA produzieren



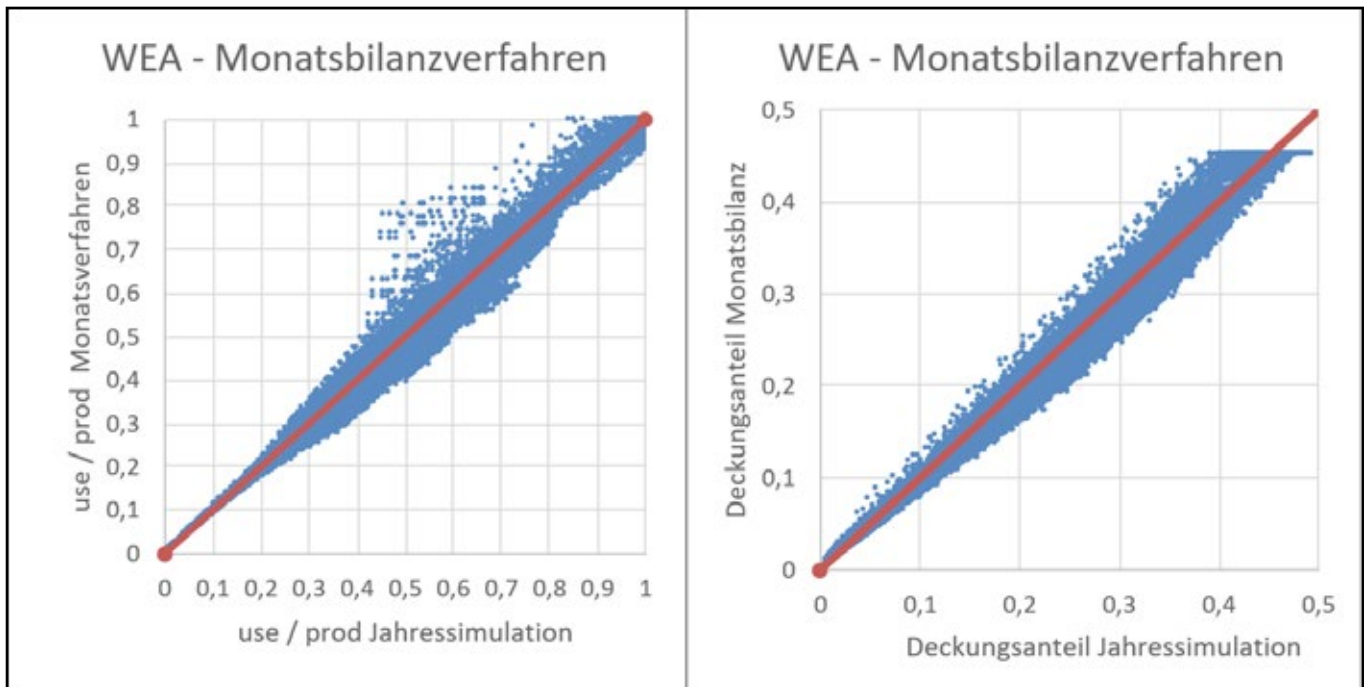


Abb. 8: Anteil der Eigenstromnutzung am gesamten WEA-Stromertrag (links) und Deckungsanteil der WEA am Gebäudestrombedarf (rechts) bestimmt über das Simulationsmodell (x-Achse) und über das entwickelte Monatsbilanzverfahren (y-Achse)

nur innerhalb bestimmter Windgeschwindigkeitsgrenzen Strom. Unterhalb der Einschaltgeschwindigkeit  $v_{\text{ein}}$  und oberhalb der Ausschaltgeschwindigkeit  $v_{\text{aus}}$  wird kein Strom erzeugt. Da der Strombedarf eines Gebäudes nur während der Laufzeiten durch die WEA gedeckt werden kann, wird ein Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Laufzeiten der WEA eingeführt. Außerdem werden die klimatischen Schwankungen bei der Stromerzeugung durch WEA mithilfe eines Korrekturfaktors berücksichtigt.

In der linken Graphik von Abbildung 8 werden die Ergebnisse des Monatsbilanzverfahrens für die Eigenstromnutzung von WEA in Nichtwohngebäuden dargestellt. Bis auf ein paar Ausreißer führt das Monatsverfahren für alle betrachteten Gebäude zu einer verlässlichen Abschätzung der Eigenstromnutzung. In der rechten Graphik von Abbildung 8 wird der Deckungsanteil der WEA am jährlichen Gesamtstrombedarf des Gebäudes dargestellt. Hier wird ersichtlich, dass die Ausreißer aus der linken Graphik keinen großen Einfluss auf die Gebäudebilanz haben, da es sich bei den Ausreißern um WEA mit einem kleinen  $\text{prod}/\text{need}$ -Verhältnis (Verhältnis zwischen der selbst erzeugten Strommenge und dem Gebäudestrombedarf) handelt.

#### Entwicklung des Monatsbilanzverfahrens für KWK-Anlagen

Wie für PV-Anlagen und WEA wird die Eigenstromnutzung von KWK-Anlagen für die Nutz- und die Nichtnutzzeiten separat bestimmt. Um die Stromerzeugung der KWK-Anlage auf die Nutz- und Nichtnutzzeiten zu verteilen, werden 2 Annahmen getroffen. Zum einen wird angenommen, dass die KWK-Laufzeiten für die Raumheizung sich gleichmäßig auf die Nutz- und die Nichtnutzzeiten verteilen. Zum anderen wird davon ausgegangen, dass die KWK-Laufzeiten für die TWW-Bereitstellung nur während der Nutzzeiten anfallen. Die Laufzeiten einer KWK-Anlage haben einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenstromnutzung. Je größer die KWK-Anlage dimensioniert ist, desto öfter taktet sie. Dadurch entsteht ein intermittierendes Stromerzeugungsprofil. In den Zeitfenstern, in denen die KWK-Anlage nicht läuft, kann der Strombedarf des Gebäudes nicht durch den Eigenstrom gedeckt werden. Die KWK-Laufzeiten werden deswegen mithilfe eines Korrekturfaktors berücksichtigt. In Abbildung 9 wird die über das entwickelte Monatsbilanzverfahren berechnete jährliche Eigenstromnutzung dargestellt. Aufgrund der komplexeren Zusammenhänge ist die

Streuung der Ergebnisse für KWK-Anlagen größer als die bei den Monatsverfahren für PV-Anlagen und WEA der Fall ist. Allerdings wird die Eigenstromnutzung über das entwickelte Monatsverfahren deutlich besser abgeschätzt als über eine einfache Monatsbilanz.

#### Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde ein erweitertes Monatsbilanzverfahren zur Bestimmung der Eigenstromnutzung von PV-Anlagen, WEA und KWK-Anlagen entwickelt. Da keine brauchbaren Messdaten konkreter Gebäude vorliegen, wird das Monatsverfahren aus Erkenntnissen eines vereinfachten stündlichen Simulationsmodells abgeleitet. Die Plausibilität des Monatsverfahrens wird ebenfalls anhand des vereinfachten stündlichen Simulationsmodells überprüft.

Für das stündliche Simulationsmodell werden sowohl für den Strombedarf als auch für die Stromerzeugung Jahresprofile generiert, die in der Bilanzierung zeitlich gegenübergestellt werden. Zur Erstellung der Jahresprofile werden im stündlichen Simulationsmodell Vereinfachungen festgelegt. Das Modell kann demnach in einer weiteren Phase verbessert oder erweitert werden. Beispielsweise wurde für das Wärmepumpen- und das KWK-Modell die Annahme getroffen, dass die erforderliche Heizleistung linear abhängig von der Außentemperatur  $T_a$  ist. Der Einfluss solarer Gewinne, interner Gewinne und der Speichermasse des Gebäudes wird hierbei nicht berücksichtigt. An dieser Stelle könnte das Modell demnach weiter präzisiert werden.

Der Aufbau des entwickelten Monatsbilanzverfahren wurde an das Wohngebäudeverfahren für PV-Anlagen nach Lichtmeß (2015) angelehnt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss von Batteriesystemen auf die Eigenstromnutzung nicht berücksichtigt. Das Verfahren zur Berücksichtigung von Stromspeichern nach Lichtmeß (2015) kann jedoch in einer späteren Arbeitsphase in das entwickelte Monatsverfahren integriert werden, da es kompatibel zu den hier gezeigten Ausätzen ist.

Das entwickelte Monatsverfahren hat Unschärfen, liefert jedoch eine deutlich bessere Abschätzung des Eigenstromanteils als eine einfache monatliche oder gar jährliche Bilanzierung. Relevant für die energetische Bewertung bzw. die Darstellung der möglichen Unschärfen ist u.a. der Anteil der Stromerzeugung bezogen auf den Gesamtstrombedarf des Gebäudes. Die resultierende

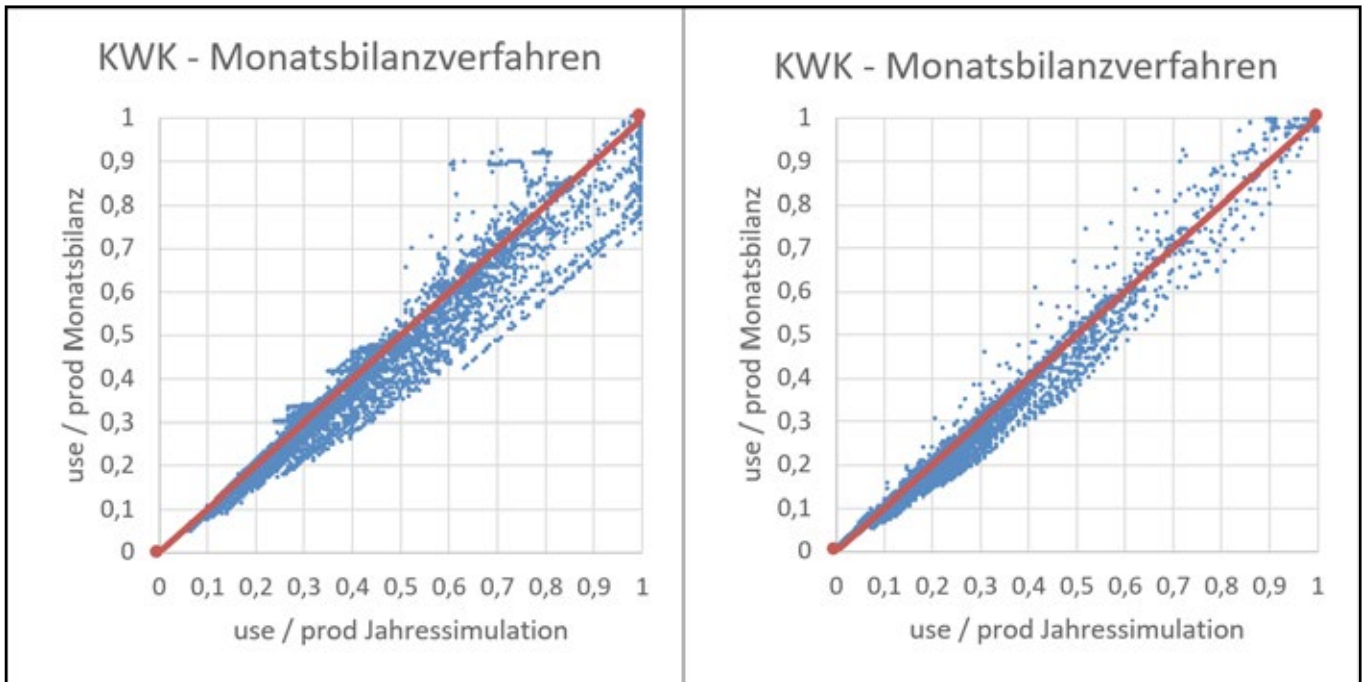


Abb. 9: Anteil der Eigenstromnutzung am gesamten KWK-Stromertrag (links) und Deckungsanteil der KWK-Anlage am Gebäudestrombedarf (rechts) bestimmt über das Simulationsmodell (x-Achse) und über das entwickelte Monatsbilanzverfahren (y-Achse)

Größe dient als Grundlage zur Klassifizierung im Energiepass. Bezogen auf die Ergebnisse der stündlichen Jahressimulation kann ein mittlerer Fehler bestimmt werden. Bei PV-Anlagen liegt der mittlere Fehler aus der Sicht der Gebäudestromanrechnung über alle betrachteten Varianten bei 2,8% (+- 4,0%) Für WEA liegt der mittlere Fehler über alle Varianten bei 1,3% (+- 1,7%). Für KWK-Anlagen liegt der mittlere Fehler bei 2,0% (+- 2,9%).

Eine mögliche Fehlerquelle besteht darin, dass das entwickelte Monatsverfahren an einem stündlichen Simulationsmodell validiert wurde. Dieses Modell kann die Realität bestenfalls nur annähernd abbilden, da bspw. die Bilanzmodelle für Wärmepumpen und KWK-Anlagen Vereinfachungen aufweisen und der reale Betrieb nicht wie in den Nutzungsprofilen vorgesehen normgerecht erfolgt. An dieser Stelle wären Messdaten konkreter Gebäude deutlich besser geeignet, die jedoch für jedes technische System vorliegen müssten. In der Regel gibt es solche Messdaten lediglich für den gesamten Strombezug des Gebäudes und nicht aufgeteilt nach technischen Gewerken. Dies wäre aber für die Stromanrechnung im Energiepass erforderlich, sofern die Bilanzgrenze der technische Strombedarf ist. Die Verfahren berücksichtigen weitestgehend die technischen und physikalischen Einflussfaktoren auf den Anteil des selbst genutzten Stroms und haben weitgehend allgemeingültigen Charakter. Darüber hinaus können die Gleichungen einfach in eine monatliche Energiebilanz integriert werden und führen allesamt zu einer deutlichen Verbesserung des Anteiles von selbst genutztem Strom am anlagentechnischen Strombedarf des Gebäudes und zu einer transparenteren Darstellung der Energieeffizienz von Gebäuden im System Energiepass.

#### Netzdienliche Integration von erneuerbarem Strom im Energiepass

Im Rahmen des Luxemburger Energiepasssystems wird nur der Strombedarf zur Versorgung des Gebäudes berücksichtigt (Heizung, TWW-Bereitstellung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung). Der Elektroenergiebedarf für Nutzwendungen (z.B. Computer, Drucker, Kühlschrank, etc.) wird in der Energiebilanz nicht mit einbezogen. Allerdings kann der Strombedarf für Nutzwendungen einen wesentlichen Einfluss auf die konkrete Nutzbarkeit von selbst erzeugtem Strom haben.

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren kann deswegen nicht als Planungsgrundlage für die Dimensionierung von PV-, Windenergie und KWK-Anlagen sowie Batteriesystemen verwendet werden, sondern dient ausschließlich der energetischen Bewertung von Gebäuden. Eine Erweiterung der Bilanzgrenze um den Strombedarf für Nutzwendungen und Allgemiestrom wäre ein möglicher und vor allem zielführender Lösungsansatz, um Gesamteffekte realitätsgetreuer abzubilden. (Lichtmeß 2015)

Das System ResoCable® ist eine zerstörungsfreie Methode zur Ermittlung des Zustandes von extremen Spanngliedern, Schrägseilen und abgespannten Seilen über eine Analyse der Eigenfrequenzen. Mit Hilfe einer numerischen Sensitivitätsanalyse wird am Beispiel der Stadthafenbrücke Sassnitz ermittelt, inwiefern der Einsatz des Frequenzmesssystems auf derart weiche Sonderkonstruktionen ausgeweitet werden kann.

Prix d'excellence 2017 mention excellent

## FREQUENZ- UND SENSITIVITÄTSANALYSE AN DEN SEILEN DER STADTHAFENBRÜCKE SASSNITZ\_

Anna Gidt

Deutschlands Bundesfernstraßennetz umfasst in etwa 39.000 Brücken. Ein Großteil dieser Brücken wurde in den 60er, 70er und 80er Jahren gebaut. Gemessen an der Brückenfläche weisen Spannbetonbrücken mit 69,9% den weitaus größten Anteil an Brücken im Bestand auf. Bedingt durch die Altersstruktur der Brücken, in Kombination mit der dynamischen Entwicklung des Verkehrsaufkommens und der permanenten Zunahme der Achsenlasten des Schwerverkehrs, sind bei älteren Bauwerken die Tragwerksreserven zunehmend aufgebraucht. Schätzungsweise 15% der bestehenden Brücken sind in einem derart schlechten Zustand, dass sie saniert werden müssen [2].

Zur Gewährleistung der Funktionsfähigkeit und Verkehrssicherheit der bestehenden Brückenbauwerke, müssen deren Zustände regelmäßig überprüft werden um Schäden und Mängel rechtzeitig erkennen und beheben zu können. Brücken zählen nach DIN 1076 zu Ingenieurbauwerken. Brückenseile sind demnach, genau wie das Gesamttragwerk, in regelmäßigen Abständen zu prüfen, dabei sind Feststellungen, die bei früheren Prüfungen gemacht wurden, zu berücksichtigen. Alle sechs Jahre ist eine Hauptprüfung an Ingenieurbauwerken durchzuführen, bei welcher alle Bauteile zu prüfen sind. Wird bei dieser Prüfung ein Schaden vermutet, ist eine Sonderprüfung durchzuführen. Drei Jahre nach einer Hauptprüfung ist eine Einfache Prüfung durchzuführen, bei der die Tragfähigkeit, die Standsicherheit und der bauliche Zustand des Bauwerks zu prüfen sind [3]. Bei den Prüfungen ist unter anderem der Korrosionsschutz von stählernen Bauteilen zu prüfen, dabei bedürfen korrosionsempfindliche Bauteile wie z.B. Seile, deren Verankerungen und Anschlüsse, sowie Berührungsstellen zwischen Beton- und Stahlbauteilen einer besonderen Beachtung [7].

Zur Prüfung der Spannglieder und Seile gibt es unterschiedliche Prüfverfahren. Die visuelle Prüfung ist die alltäglichste Methode der Zustandserfassung. Hierbei werden alle Bauteile auf sichtbare Schäden untersucht. Allerdings sind einige Schäden erst in fortgeschrittenen Stadien erkennbar. So sind einzelne Drahtbrüche bei Spanngliedern oder Seilen meist von außen nicht sichtbar. Weitere Verfahren zur Prüfung des Zustandes von externen Spanngliedern und Schrägseilen können in Prüfmethoden zur Ermittlung der Spannkraft und Methoden zur Schadensdetektion unterteilt werden.

Mit Kenntnis der Spannkraft kann auf den Zustand des Spanngliedes geschlossen werden und so können Schäden, bevor sie am Bauwerk sichtbar sind, beurteilt werden. Zu den gängigsten Verfahren der Spannkraftermittlung zählen statische und dynamische Verfahren, magnetoelastische Messungen und das Ansetzen von Spannpressen. Beim statischen Verfahren wird das Spannglied mittels einer definierten Kraft ausgelenkt, die Spannkraft wird anschließend aus einer Kalibrierungskurve und der gemessenen Auslenkung ermittelt. Bei dynamischen Messungen werden die Eigenfrequenzen der Spannglieder gemessen, woraus die Spannkraft näherungsweise berechnet werden kann. Bei magnetoelastischen Verfahren müssen die Sensoren bereits beim Einbau der Spannglieder montiert und kalibriert werden. Bei letztgenanntem Verfahren werden Spannpressen angesetzt und mittels Abhebekontrollen bzw. Lift-Off-Tests die Spannkraft ermittelt. Hierfür sind eine freie Zugänglichkeit des Spannankers sowie ein dauerplastischer Korrosionsschutz notwendig [8]. Methoden der Schadensdetektion können in zerstörungssarm und zerstörungsfrei Verfahren unterteilt werden. Zu den zerstörungssarmen Verfahren zählen unter anderem elektromagnetische Resonanzmessungen. Als zerstörungsfreie Prüfmethoden kommen das Ultraschallecho-Verfahren und die magnetische Ortung von Spanndrahtbrüchen in Frage [7].

Viele der genannten Verfahren sind zeitaufwendig und teuer. Zudem ist es häufig erforderlich, die Brücke ganz oder teilweise für den Verkehr zu sperren. Ein neues dynamisches Verfahren, entwickelt von Herrn Prof. Dr.-Ing Lothar Stempniewski und Herrn Dipl.-Ing Steffen Siegel am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) in Kooperation mit den Unternehmen Ziegler-Instruments GmbH und Breinlinger Ingenieure Hoch- und Tiefbau GmbH, bietet eine kostengünstige, schnelle und zuverlässige Alternative. Dieses Verfahren, mit dem registrierten Namen ResoCable® ist sowohl für extern vorgespannte Spannglieder, als auch für Schrägseile oder sonstige abgespannte Seile anwendbar.

ResoCable® ist eine zerstörungsfreie Methode zur Ermittlung des Zustandes von externen Spanngliedern, Schrägseilen oder sonstigen abgespannten Seilen. Das Verfahren beruht auf dynamischer Messung





Abb. 1: Befestigung der Sensorbox: links an einem Abspannseil und rechts an einem Hänger der Stadthafenbrücke Sassnitz

des Schwingungsverhaltens der Seile, infolge einer Anregung der Seile. Am Seil werden mittels Magneten, Sensoren angebracht, die die Eigenfrequenzen messen. Vom Soll-Wert abweichende Frequenzen weisen dabei auf eine Spannkraftänderung und demzufolge einen möglichen Schaden im Seil hin. Durch Vergleich mit früheren Messungen kann demnach auf den Zustand des Spannglieds geschlossen werden. Dabei ist das vorrangige Ziel nicht, die Änderungen der Spannkraft bezogen auf den Ausgangszustand zu bestimmen. Vielmehr sollen die Messungen Indikatoren liefern, ob sich der Zustand des externen Spannglieds oder Seils innerhalb oder außerhalb eines Toleranzbereiches befindet.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Prüfverfahren, stellt ResoCable® eine einfache, schnelle und demnach kostengünstige Alternative zur Zustandserfassung von Seilen dar. Sowohl die Montage, wie auch die Messung selbst, dauert nur wenige Minuten, sodass es möglich ist alle Messungen an einem Bauwerk innerhalb weniger Stunden durchzuführen [7].

Die Montage der Sensoren mittels Hochleistungsmagneten an den Seilen ist der erste Schritt des Messablaufs. Die optimale Platzierung des Sensors ist in etwa in der Mitte des Spannglieds bzw. des Seils, da dort der Einfluss der Verankerung auf die Eigenfrequenzen am geringsten ist.

Alle Messpunkte werden durch einen Barcode gekennzeichnet, der mit einem Scanner erfasst wird. Folglich können so alle Messpunkte eindeutig identifiziert werden. Das zum Messsystem dazugehörige Messgerät wurde auf PC-Basis entwickelt. Die Bedienung des Messgeräts erfolgt mittels Touchscreen-Technik.

Zur Messung der Eigenfrequenzen werden die Seile entweder durch einen Schlag mit einem Gummihammer angeregt, oder die Anregung erfolgt ambient, z.B. durch Wind oder Verkehr. Dabei bringt die kinetische Energie, eingeleitet durch den Schlag, das Seil zum Schwingen. Die gemessenen Frequenzen werden mittels einer Datenverarbeitungsanlage erfasst und gespeichert. Die Ergebnisse können so direkt vor Ort eingesehen und ausgewertet werden. Liegen bereits Daten von früheren Messungen vor, stehen diese, sowie zuvor definierte Toleranzen, zur Beurteilung der neuen Ergebnisse unterstützend zur Verfügung. Kommt es, bei aktuellen

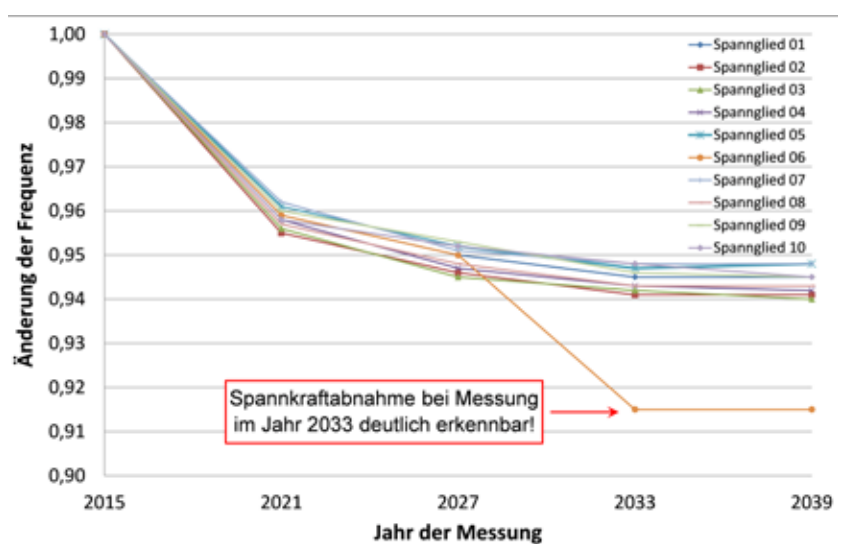


Abb. 2: Frequenzänderung an Spanngliedern einer neuen Brücke inkl. Schädigung eines Spanngliedes [7]

Messungen, im Vergleich zu historischen Messergebnissen zu signifikanten Abweichungen, können die Messungen direkt wiederholt werden, um eventuelle Messfehler auszuschließen [7].

Die Frequenz eines Seils ist neben der Seilkraft abhängig von seiner Länge. Da nicht unbedingt alle Seile eines Bauwerks die gleiche Länge haben, und nicht exakt gleich vorgespannt sind, weisen die Seile im Prinzip unterschiedliche Eigenfrequenzen auf. Aus diesem Grund werden die Seile bei Messungen nicht nur untereinander verglichen, sondern mit Referenzmessungen. Dazu werden die gemessenen Eigenfrequenzen auf die Erstmessungen des entsprechenden Abschnittes normiert. Die Ergebnisse der Messungen werden in einer zentralen Datenbank gespeichert und können bei Wiederholungsmessungen abgerufen werden. So können Frequenzänderungen der einzelnen Seile zu früheren Messungen festgestellt werden. Werden regelmäßig Messungen an den Seilen vorgenommen, kann auf eventuelle Änderungen zeitnah reagiert werden [7].

Die Spannkraft in den Seilen ist abhängig von äußeren Belastungen, wie beispielsweise Temperatur- und Windbelastungen. Idealerweise sollen die Messungen unter ähnlichen äußeren Bedingungen stattfinden. Um





Abb. 3: Stadthafenbrücke Sassnitz ©wilfried-dechau.de <<http://wilfried-dechau.de>>

die Temperaturbelastung annähernd konstant zu halten, finden die Messungen am Besten im Morgengrauen oder bei bewölktem Himmel statt, da die Seile sich bei direkter Sonneneinstrahlung sehr schnell erwärmen. Zudem sollen die Windeinwirkungen möglichst gering sein.

Neben den äußeren Einwirkungen wird die Spannkraft in den Seilen durch Schwinden, Kriechen und Relaxation beeinflusst. Im Laufe der Zeit nimmt die Spannkraft infolge der eben genannten Effekte ab. Dies führt ebenfalls zu einer Abnahme der Frequenzen. Führt man regelmäßig Frequenzmessungen an den Seilen durch und wertet die Abweichungen der Frequenzen aus, so kann man diese Effekte quantifizieren. Liegen die Frequenzänderungen der Seile in einem ähnlichen Bereich, kann davon ausgegangen werden, dass die Abweichungen mit den zeitabhängigen Spannkraftverlusten zusammenhängen. Wird an einem Seil allerdings der festgelegte Toleranzbereich über- bzw. unterschritten, muss von einem Spannkraftabfall infolge von Schäden am Seil ausgegangen werden (Abbildung 2).

Nach Theorie ist die Anwendung des Messsystems ResoCable® auf Spannglieder und Seile mit einem geringen Seildurchhang begrenzt. Beispielsweise weisen Tragseile von Hängebrücken nach [8] einen zu großen Seildurchhang auf, um dynamische Messungen an diesen durchführen zu können. Betrachtet man das Tragseil allerdings nicht als Ganzes, sondern unterteilt in Segmente zwischen den Hängern, so ist der Durchhang je Segment gering und das Verfahren ist theoretisch anwendbar.

In Zuge der Arbeit soll anhand der Stadthafenbrücke Sassnitz mittels einer numerischen Sensitivitätsanalyse ermittelt werden, inwiefern der Einsatz des Frequenzmesssystems ResoCable® auf derart weiche Sonderkonstruktionen ausgeweitet werden kann. Dadurch könnte die Anwendung des Messsystems ResoCable® von Spanngliedern, Schrägseilen und Abspannseilen auf Tragseile und Hängeseile ausgeweitet werden. Dabei besteht das Ziel darin zu untersuchen, wie groß der Einfluss von einzelnen oder mehreren Drahtbrüchen über die gesamte Seillänge oder Teillängen auf die Frequenzen des geschädigten Seils sowie auf die der restlichen Seile im Bauwerk ist.

Die Stadthafenbrücke in Sassnitz wurde 2007 fertiggestellt. Seitdem ist sie ein Wahrzeichen der Hafenstadt Sassnitz und wird auch „Balkon zum Meer“ genannt. Die Fußgängerbrücke ist insgesamt 243m lang und verbindet

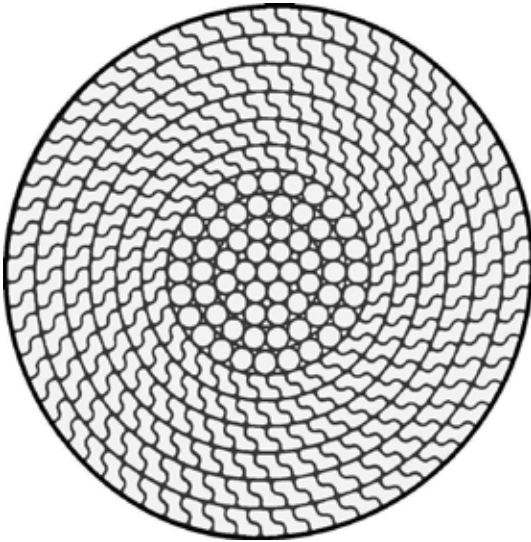
die Stadt Sassnitz mit dem 22m tiefer gelegenen Hafen. Sie besteht aus einer 124m langen Rampenbrücke als Verbundkonstruktion und einer 119m weit gespannten Seilbrücke. Der Deutsche Brückenbaupreis 2010 wurde in der Kategorie „Fuß- und Radwegbrücken“ an die Stadthafenbrücke in Sassnitz verliehen. Die Jury beschrieb die Brücke mit folgenden Worten: „Eine leichte, transparente Konstruktion, die von keinem Punkt aus den Blick auf Hafen und Meer verbaut.“ und „Die neue Stadthafenbrücke überzeugt durch eine optimale Kombination von Form und Funktion. [...] Sie löst eine schwierige Aufgabe mit scheinbar mühelosem Schwung.“ [1].

Entworfen wurde die Brücke von Prof. Dr. sc. tech. Mike Schlaich und Dipl.-Ing. Andreas Keil von Schlaich Bergmann und Partner in Stuttgart, die ebenfalls die Ausführungsplanung übernommen haben.

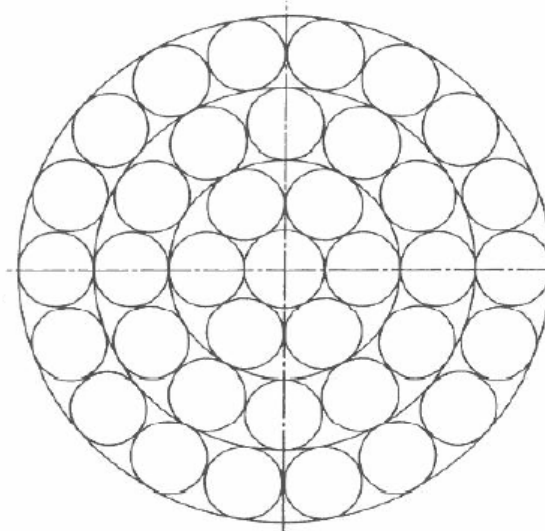
Die höher liegende Hängebrücke ist als sogenannter „leichter, einseitig aufgehängter Kreisringträger“ mit einem Mast ausgebildet. Mit einer Länge von 119m ist sie die längste Hängebrücke dieser Art. Besonders ist dabei vor allem die exzentrische Verankerung der Hängeseile an Kragarmen über der Fahrbahn. Üblicherweise werden bei Kreisringträgern, die Hänger direkt am Überbau verankert. Dies würde bei der Hängebrücke in Sassnitz allerdings schon unter Eigenlast zu großen Torsionsbeanspruchungen führen.

Um diesen Effekt zu reduzieren, wurden die Hänger an Kragarmen befestigt, die immer so weit herausragen, dass die Hängerachse genau durch den Schwerpunkt des Überbaus führt. Dadurch wird die Beanspruchung reduziert und der Überbau kann extrem schlank ausgeführt werden. Die unterschiedlichen Hängerneigungen führen zu unterschiedlichen Höhen der Kragarme. Im Außenbereich sind die kleinsten Kragarme, die bis zur Mitte hin anwachsen. Dies unterstreicht den Schwung und die räumliche Wirkung der Brücke [6].

Die Seilbrücke wird von einem einzelnen 40m hohen Mast getragen. Der leicht geneigte, gelenkig gelagerte Mast ist aus einem Stahlrohr ausgebildet. Die gelenkige Lagerung am Stützenfuß ist durch eine massive Stahlkugel ausgebildet. Zwei, wegen der Schrägstellung des Mastes, ständig unter Zug stehende Abspannseilpaare sorgen dafür, dass die Verformungen im Tragwerk gering bleiben. Der Überbau wird über Hängeseile im Abstand



\_Abb. 4: Querschnitt Vollverschlossenes Seil [9]



\_Abb. 5: Querschnitt eines offenen Spiralseils [4]

von ca. 4m an das Tragseil der Brücke angeschlossen. Bei der Brücke gibt es nicht ein Tragseil, das über die gesamte Brückenlänge gespannt ist und am Pylon umgelenkt wird, sondern zwei einzelne Tragseile, die gelenkig am Pylon angeschlossen sind. Die Hänger sind über Seilklemmen an den Tragseilen befestigt.

Die Abspannseile und die Tragseile sind aus vollverschlossenen Seilen aus galvanbeschichteten Drähten hergestellt. Vollverschlossene Seile werden bereits seit mehreren Jahrzehnten im Brückenbau verwendet. Dennoch haben stetig technische Weiterentwicklungen stattgefunden. Die Seile, einschließlich ihrer Verankerungen, werden komplett im Werk hergestellt und einbaufertig zur Baustelle transportiert [5].

Vollverschlossene Seile sind Zugglieder, die aus Runddrähten und Z-Profildrähten zusammengesetzt sind. Dabei besteht das Seilinnere aus mehreren Lagen Runddrähten und ist von mehreren Lagen Profildrähten, die ineinander greifen, umschlossen. Durch Aufbringen einer Zugkraft, bilden die Z-Drähte aufgrund seitlicher Pressungen, eine glatte, geschlossene Oberfläche. Dies verhindert das Eindringen von unerwünschten Fremdstoffen.

Bei vollverschlossenen Seilen wird die Zugkraft durch Verseilung auf viele einzelne Drähte aufgeteilt, wodurch eine hohe Redundanz besteht. Im Falle eines Drahtbruchs, wird der Restquerschnitt nur leicht geschwächt. Dieser Querschnittsverlust, bzw. Tragkraftverlust wird durch Sicherheitsfaktoren abgedeckt. Zudem tragen gebrochene Drähte bereits nach etwa drei Schlaglängen wieder voll mit. Dieser wesentliche Vorteil beruht auf der, durch die Verseilung hervorgerufenen inneren Reibung zwischen den Drähten. Daher sind selbst mehrere Drahtbrüche unproblematisch, wenn sie ausreichend gleichmäßig über die Seillänge verteilt sind [5].

Die Hänger der Stathafenbrücke sind als offene Spiralseile aus nicht rostendem Edelstahl ausgeführt. Offene Spiralseile werden vor allem bei kleineren Tragwerken mit geringen Lasten eingesetzt.

Offene Spiralseile, bestehen nur aus Runddrähten. Genau wie bei den vollverschlossenen Seilen, wird ein kreisrunder Kerndraht von sechs Runddrähten schraubenförmig umschlagen. Die Drahtlage darüber ist in Gegenrichtung verseilt, um die Dreieigenschaften zu optimieren.

Wesentlicher Unterschied zu den vollverschlossenen Seilen ist, dass um die Runddrähte keine Z-Drähte liegen und somit keine geschlossene Oberfläche vorhanden ist [3].

Im Gegensatz zu externen Spannglieder, die sich im inneren des Hohlkastens befinden und so weitestgehend von Witterungseinflüssen geschützt sind, sind die Seile der Stadthafenbrücke Sassnitz dauerhaft äußeren Einwirkungen aus Wind und Temperatur ausgesetzt. Besonders Regen und Feuchtigkeit können bei unsachgemäßer Ausführung und Wartung der Schutzmaßnahmen zu korrosiven Prozessen führen, die einzelne Drahtbrüche bis hin zu Komplettausfällen hervorrufen können. Werden Schäden in Form von Drahtbrüchen frühzeitig erkannt, können Gegen- oder Verstärkungsmaßnahmen vorgenommen werden, bevor es zu Komplettausfällen kommt. Drahtbrüche bedeuten Querschnittsminderungen der Seile, welche durch Frequenzmessungen erkannt werden sollen.

Mit Hilfe dieser numerischen Analyse sollen aus zukünftigen Frequenzmessungen Rückschlüsse bezüglich der Intaktheit der Seile getroffen werden können. Dazu werden Lastumlagerungsvorgänge und die dadurch entstehenden Frequenzänderungen in den Seilen aufgrund äußerer Einwirkungen sowie Querschnittsminderungen untersucht. Die Sensitivitätsanalyse wird anhand des numerischen Modells der Stadthafenbrücke in SOFiSTiK durchgeführt.

Unter äußeren Einwirkungen kommt es zu Verformungen der Hängebrücke, die wiederum Lastumlagerungen mit sich bringen. Lastumlagerungen in den Seilen bewirken Frequenzänderungen. Um eine sinnvolle Analyse der Auswirkungen einzelner Drahtbrüche bis hin zu Komplettausfällen von Seilen durchführen zu können, muss zunächst die grundsätzliche Sensitivität der Seilkonstruktion im Hinblick auf Temperatur- und Windbelastung untersucht werden. Dazu werden die Belastungs- und Frequenzänderungen der Seile infolge äußerer Einwirkungen mithilfe der Software SOFiSTiK bestimmt.

Diese werden anschließend mit den durch Drahtbrüche hervorgerufenen Belastungs- und Frequenzänderungen verglichen. Ziel dabei ist zu bestimmen, ob in-situ gemessene Frequenzänderungen aus Drahtbrüchen resultieren oder ob das Tragwerk derart sensibel auf äußere Einwirkungen reagiert, dass die gemessenen Frequenzänderungen sich aus diesen ableiten.

Im Zuge der Sensitivitätsanalyse werden verschiedene Belastungssituationen am SOFiSTiK-Modell simuliert.

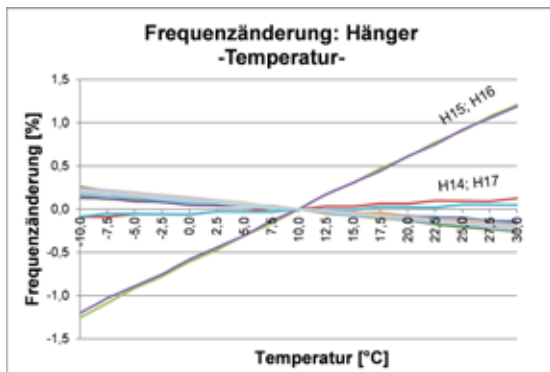


Abb. 6: Frequenzänderung unter Eigengewicht und Temperatureinwirkung – Hänger H02 bis H29

Dabei werden einzelne Parameter verändert, wodurch Kraftumlagerungen und demnach Frequenzänderungen hervorgerufen werden. Diese Parameterstudie dient der Ermittlung der Anfälligkeit der Konstruktion auf Belastungssituationen, die bei in-situ Messungen vorkommen können. Bei der Sensitivitätsanalyse unter Temperatur- und Windeinwirkungen wird davon ausgegangen, dass die Seile intakt sind und demnach ihre volle Tragfähigkeit wirkt. Als Referenzwert werden die Kraftverhältnisse unter Eigengewicht bei der Aufstelltemperatur von 10°C, ohne Windeinwirkung, herangezogen. Die aus den Veränderungen der Ausgangsparameter hervorgerufenen Eigenfrequenzänderungen werden mit dem Referenzwert in Relation gesetzt. Daraus können Rückschlüsse über die Lastumlagerungsvorgänge und Frequenzänderungen getroffen werden.

Zunächst werden die Lastumlagerungsvorgänge unter Eigengewicht der Konstruktion in Kombination mit Temperaturveränderungen betrachtet. Bei der Sensitivitätsanalyse wird vernachlässigt, dass sich die Bauteile bei Temperaturschwankungen nicht gleich schnell und gleich stark aufwärmen bzw. abkühlen. Es wird angenommen, dass alle Bauteile die gleiche Temperatur aufweisen wie die Außenluft. Werden die in-situ Messungen vor Sonnenaufgang oder bei bewölktem Himmel durchgeführt, ist diese Annahme zulässig. Für die Sensitivitätsanalyse wird eine Temperaturspanne von 40°C, beginnend bei -10°C und endend bei +30°C in Schritten von 2,5°C ausgewertet. Der Referenztemperatur ist auf 10°C festgelegt. Temperaturerhöhungen bzw. -senkungen

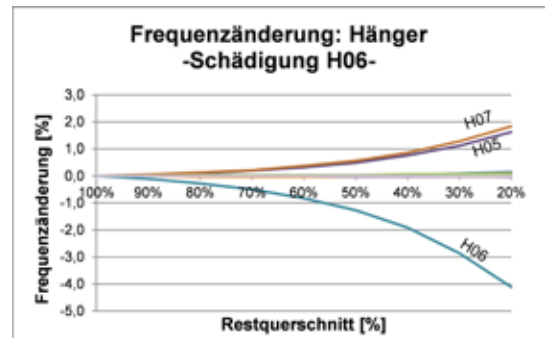


Abb. 7: Frequenzänderung bei Schädigung des Hängers H06 – Hänger H02 bis H29

führen zu Materialdehnungen bzw. -stauchungen der Brückenkonstruktion, die Lastumlagerungen mit sich bringen. Diese Lastumlagerungen führen wiederum zu Frequenzab- bzw. -zunahmen in den Seilen.

Bei einer Temperaturabnahme kommt es zu Stauchungen der Bauteile. Sowohl der Mast, als auch die Seile verkürzen sich. Dadurch werden die Abspannseile entlastet. Die Trageile hingegen erfahren eine Lastzunahme. Zudem kommt es zu einer Verkürzung des Überbaus, der dadurch einen geringeren Durchhang gegenüber der reinen Belastung aus Eigengewicht aufweist. Aufgrund des geringeren Durchhangs werden die äußeren Hänger stärker belastet und die vier mittleren Hänger entlastet, wobei diese Lastabnahme bei den beiden mittleren Hängern am größten ist.

Bei einer Temperaturzunahme erfolgt die Kraftumlagerung genau andersrum. Sie führt zu einer Streckung der Bauteile, wodurch die Abspannseile eine Lastzunahme erfahren und die Trageile eine Lastabnahme. Der Durchhang des Überbaus nimmt zu, wodurch die vier mittleren Hänger eine Lastzunahme erfahren, während die restlichen Hänger entlastet werden.

Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass die Frequenz- sowie die Seilkraftänderungen, abgesehen von jenen der beiden mittleren Hängern H15 und H16, unter Temperatureinwirkungen relativ gering sind. Darüber hinaus wird der lineare Verlauf der prozentualen Frequenzänderungen in Abhängigkeit der Temperatur deutlich.



Abb. 8: Stadthafenbrücke Sassnitz

Anschließend wird die Seilkonstruktion auf ihre Sensitivität gegenüber Windeinwirkungen analysiert. In der Parameterstudie werden acht verschiedene Windrichtungen, in 45° Schritten betrachtet. Die Bezeichnung der jeweiligen Windrichtungen beruht dabei, in Anlehnung an die Kompassrose auf einer 360°-Einteilung. Frequenzmessungen an Bauwerken sollten möglichst unter schwachen, gleichmäßigen Windgeschwindigkeiten erfolgen. Dennoch wird eine relativ große Windgeschwindigkeitspanne von 0 m/s bis 25 m/s gewählt, um möglichst ausdrucksstarke Ergebnisse zu erzielen.

Auch hier wird neben der Erkenntnis des geringen Einflusses von Windeinwirkungen auf die Frequenzen der Hänger ein linearer Verlauf der prozentualen Frequenzänderung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeiten deutlich.

Die Stadthafenbrücke in Sassnitz besitzt aufgrund der filigranen und leichten Bauweise eine kleine Angriffsfläche für Wind- und Temperatureinwirkungen. Demzufolge sind die Verschiebungen und Verformungen infolge solcher Belastungen relativ gering. Dies führt wiederum dazu, dass die Umlagerungen der Seilkräfte infolge dieser Belastungen von geringem Ausmaß sind. Folglich liegen die, durch dies hervorgerufenen Frequenzänderungen ebenfalls, in einem überschaubaren Bereich.

Gleichwohl ist, wie die Auswertungen gezeigt haben, ein linearer Zusammenhang zwischen den Änderungen der Belastungssituationen und den Änderungen der Seilkräfte feststellbar. Der lineare Zusammenhang lässt sich von den Seilkraftänderungen auf die Änderungen der Frequenzen übertragen. Dieser Sachverhalt lässt die Bildung eines durchschnittlichen, prozentualen Wertes der Frequenzänderung bezüglich der jeweiligen Belastungssituationen zu.

Anschließend werden die Lastumlagerungen infolge von Querschnittsminderungen der Seile untersucht. Dabei werden unterschiedliche Ausfallgrade, von 1% bis hin zu Komplettausfällen, bei der Referenztemperatur von 10°C und ohne Windeinwirkungen betrachtet. Die aus den Querschnittsminderungen resultierenden Frequenzänderungen werden auch hier mit dem Referenzwert in Relation gesetzt. Ziel dabei ist, festzustellen inwiefern einzelne Drahtbrüche Auswirkungen auf das Tragverhalten der betroffenen Seile selbst sowie auf das Tragverhalten der gesamten

Seilkonstruktion haben. Zudem soll herausgefunden werden, ab welchem Ausfallgrad ein Schaden am jeweiligen Seil bzw. an den umliegenden Seilen detektiert werden kann.

Drahtbrüche können sich prinzipiell auf zwei verschiedene Arten vollziehen. Die gebrochenen Drähte werden entweder aufgrund der gegenseitigen Fixierung durch die Verseilung in ihrer Lage gehalten oder sie beginnen sich vom Seil abzuwickeln. Bei erstgenanntem Fall bleibt sowohl die Masse, als auch die Steifigkeit des Seils erhalten. Diese Art von Schaden ist i.d.R. visuell nicht von außen erkennbar. Wickeln sich jedoch einzelne Drähte vom Seil ab, bleibt die Masse des Seils erhalten, während die Steifigkeit abnimmt. Abwickelnde Drähte können meist bei visuellen Prüfungen erkannt werden. Frequenzmessungen an den Seilen sollen vor allem Schäden, die von außen nicht sichtbar sind, aufdecken. Um allerdings auch Erkenntnisse über den Einfluss der Steifigkeit bei Seilschäden auf die Frequenzen zu gewinnen, werden in dieser Studie beide Fälle untersucht.

Im Wesentlichen wurden zwei unterschiedliche Umlagerungsverhalten infolge von Querschnittsminderung an den Hängern konstatiert. Dabei sind die Frequenzänderungen der Tragseile und Abspannseile derart gering, dass sie nicht aussagekräftig sind. Schäden an den kürzeren Hängern führen zu einer Frequenzabnahme im betroffenen Hänger selbst und zu einer Frequenzzunahme in den benachbarten Hängern. In den weiter vom geschädigten Hänger entfernten Seilen sind die Frequenzzunahmen so gering, dass infolge dieser keine Schlüsse bezüglich eines Schadens getroffen werden können.

Querschnittsminderungen an den längeren Hängern führen hingegen zu einer Frequenzzunahme im Hänger selbst und einer Frequenzabnahme in den umliegenden Hängern. Hieraus wird deutlich, dass Drahtbrüche an den längeren Hängern mithilfe von Frequenzmessungen, verhältnismäßig früh erkannt werden können.

Die Frequenzanalyse der Hänger hat ergeben, dass jeweils nur die Frequenzen des betroffenen Hängers und die der umliegenden Hängern wesentlich von Querschnittsminderungen beeinflusst werden. Dadurch sind Schäden eindeutig zuordenbar. Allerdings sind die Frequenzänderungen infolge von Drahtbrüchen bei einigen Hängern so gering, dass Schäden anhand von Frequenzmessungen erst dann aufgedeckt werden können, wenn diese bereits in einem derart fortgeschrittenen Zustand sind, dass sie mit bloßem Auge erkennbar sind. Zudem sind



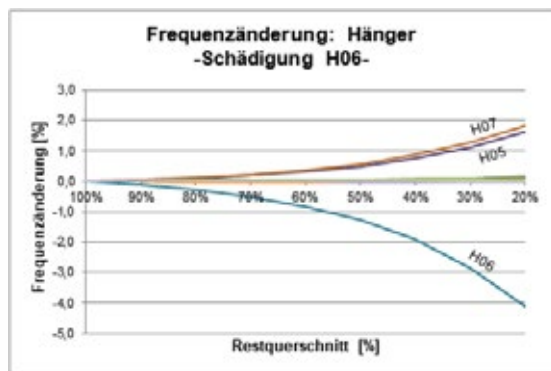


Abb. 9: Frequenzänderung bei Schädigung des Hängers H06 – Hänger H02 bis H29

Frequenzmessungen an einigen kürzeren Hängern nicht durchführbar, da diese zu kurze freie Schwingungslängen besitzen.

Die Frequenzänderungen der Abspannseile und Hänger durch Querschnittsminderungen an den Tragseilen sind nicht signifikant. Liegt ein Schaden in einem Tragseilabschnitt vor, führt dies zu einer Frequenzabnahme in sämtlichen Tragseilabschnitten. Dabei erfährt das Tragseil, in dem sich der geschädigte Abschnitt befindet, eine größere Abnahme. Allerdings haben die Untersuchungen ergeben, dass Frequenzmessungen für die Detektion von Schäden an den Tragseilen nicht geeignet sind.

Die wahrnehmbaren Frequenzänderungen infolge von Querschnittsminderungen an den Tragseilabschnitten sind zu gering, um anhand von diesen Aussagen bezüglich möglicher Schäden treffen zu können. Zudem sind Frequenzmessungen an den Tragseilabschnitten wegen der weichen Konstruktion womöglich nicht auswertbar. Die einzelnen Abschnitte werden durch die Seilklemmen, an denen die Hänger befestigt sind, zwar gehalten, jedoch nicht ausreichend fixiert um saubere Schwingungen über einen Tragseilabschnitt messen zu können. Hinzu kommt, dass die Längen der einzelnen Tragseilabschnitte für präzise Frequenzmessungen zu kurz sind.

Querschnittsminderungen an den Abspannseilen führen zu markanten Frequenzänderungen im geschädigten sowie dem parallel dazu verlaufenden Seil. Die Frequenzen der restlichen Seile bleiben nahezu unbeeinflusst. Durch die große Länge der Seile wäre allerdings eine sehr hohe

Messgenauigkeit, welche die derzeit maximal mögliche Frequenzauflösung übersteigt, erforderlich, um Frequenzänderungen infolge von Schäden an den Seilen, zuverlässig beurteilen zu können.

Weiterhin zeigen die Auswertungen, dass die schadigungsbedingten Frequenzänderungen abhängig vom auftretenden Schadensfall sind. Die reduzierte Steifigkeit infolge der sich abwickelnden Drähte, verursacht eine geringere Frequenz des geschädigten Seils, verglichen mit dem Schadensfall der vollen Steifigkeit durch Fixierung der gebrochenen Drähte. Da man allerdings davon ausgehen kann, dass sich abwickelnde Drähte, von außen sichtbar sind, sind bei zukünftigen Frequenzmessungen vorwiegend gebrochene Drähte im inneren des Seils aufzuspüren. Bei den Untersuchungen infolge von Querschnittsminderungen über die gesamte Seillänge, bleibt ein wesentlicher Vorteil von vollverschlossenen Seilen unberücksichtigt. Durch die innere Reibung zwischen den Drähten, tragen gebrochene Drähte bereits nach drei Schlaglängen ober- und unterhalb des Drahtbruchs wieder voll mit. Inwiefern diese positive Eigenschaft von vollverschlossenen Seilen auf offene Seile übertragen werden kann ist zwar unklar, dennoch werden auch für diese Lastumlagerungen infolge von Querschnittsminderungen über Teillängen der Seile untersucht. Die Lage des Schadens bezüglich der lokalen x-Achse hat einen geringen Einfluss auf die Frequenzen der betroffenen und umliegenden Seile. Der Einfluss ist umso erheblicher, je länger das Seil ist. Dennoch spielt die Lage des Schadens im Vergleich zur Ausfalllänge nur eine untergeordnete Rolle.

Liegt der Schaden über die gesamte Seillänge vor, so ist eine Veränderung der Eigenfrequenzen im einstelligen Nachkommabereich bereits ab einem Ausfall von nur wenigen Drähten ersichtlich. Werden jedoch die zusätzlichen technischen Ressourcen des Seils, infolge der Redundanz bei der Schadenssimulation berücksichtigt, so belaufen sich die Frequenzänderungen erst ab einem wesentlich höheren Ausfallgrad im einstelligen Nachkommabereich. Die Anzahl an Drahtbrüchen, ab welchen eine ersichtliche Frequenzänderung feststellbar ist, ist umso kleiner, je größer die Ausfalllänge der gebrochenen Drähte ist. Da sich reale Schäden zumeist nicht über die gesamte Seillänge vollstrecken, sind Querschnittsminderungen an vollverschlossenen Seile



Abb. 10: Stadthafenbrücke Sassnitz

aufgrund des Redundanzverhaltens, erst ab höheren Ausfallgraden durch Frequenzmessungen erkennbar.

Werden die Frequenzänderungen infolge von Querschnittsminderungen denjenigen durch äußere Belastungen gegenüber gestellt, wird offenkundig, dass diese für kleine Ausfallgrade und großen äußeren Belastungen aus Wind und Temperatur in ähnlichen Größenordnungen liegen. Im Vergleich zu den Hängern, reagieren die Abspannseile nur geringfügig auf Temperaturänderungen, aber ausgeprägt auf Windeinwirkungen. Demnach ist es unabdingbar bei Frequenzabweichungen zu klassifizieren, ob diese Änderungen aus äußeren Belastungen oder aus Drahtbrüchen resultieren. Um bei zukünftigen Messungen zur Zustandserfassung der Seile wind- und temperaturbedingte Frequenzänderungen von schadensbedingten Frequenzänderungen unterscheiden zu können, besteht die Möglichkeit, die gemessenen Frequenzen auf den Referenzzustand zu normieren.

Dies erfolgt anhand der durchschnittlichen, prozentualen Frequenzänderungen  $\alpha$ . Neben der Temperatur muss die Windrichtung sowie die durchschnittliche Windgeschwindigkeit während der Dauer der Frequenzmessung erfasst werden. Mit den normierten Werten können Frequenzänderungen infolge von äußeren Belastungen aus Wind und Temperatur nahezu ausgeschlossen werden. Insgesamt lässt sich sagen, dass dynamische Frequenzmessungen zur Zustandserfassung nur bedingt für die Seile der Stadthafenbrücke in Sassnitz geeignet sind. Dennoch sollten im Jahre 2021, im Rahmen der nächsten Hauptprüfung, Wiederholungsmessungen am Bauwerk durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt wird ein Hubsteiger vor Ort sein, der die uneingeschränkte Zugänglichkeit an sämtliche Seile der Brücke ermöglicht.

Jegliche, aus der Sensitivitätsanalyse resultierenden Gesetzmäßigkeiten dieser Arbeit beziehen sich auf das vorliegende Beispielobjekt. Eine Pauschalisierung der Vorgehensweise und Auswertung auf weitere Tragwerke ist derzeit nicht möglich und würde eine spezifische Prüfung erfordern.

Bei zukünftigen Untersuchungen an temperatur- und windbeanspruchten Konstruktionen ist es erforderlich, die Sensitivität des Bauwerks gegenüber äußeren Belastungen zu analysieren. Erst anhand dieser Erkenntnisse, können mit Frequenzmessungen

zuverlässige Aussagen bezüglich des Zustandes der Seile getroffen werden. Unter Zuhilfenahme und Anpassung der in dieser Arbeit erstellten Berechnungstabellen lässt sich der Aufwand zur Erstellung von Gesetzmäßigkeiten beliebiger Tragwerke, ähnlicher Komplexität, reduzieren.

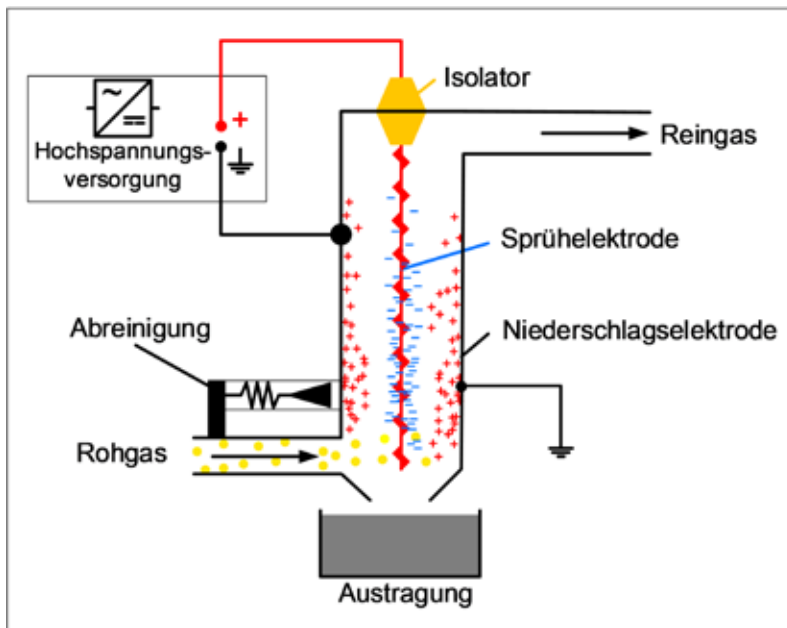
#### Literatur

- [1]: Bundesingenieurkammer und Verband Beratender Ingenieure (Hrsg.): Brückenbaupreis 2010 – Dokumentation. Berlin, 2010
- [2]: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – Bericht „Strategie zur Ertüchtigung der Straßenbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen“. Berlin, 22. Mai 2013
- [3]: DIN 1076:1999-11. Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung. 1991
- [4]: Feyrer, K., Beck, W., Becker, K., Gabriel, K., Hemminger, R., Oplatka, G., Stauske, D.: Stehende Drahtseile und Seilverbindungen. Stuttgart: Expert Verlag, 1990
- [5]: Kuhlmann, U.: Stahlbaukalender 2012, Eurocode 3 – Grundnorm Brücken. Stuttgart: Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2012
- [6]: Mehlhorn, G., Curbach, M.: Handbuch Brücken – Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten, 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [7]: Siegel, S.: ResoCable® - Schnelltest zur in-situ-Überprüfung von externen Spanngliedern und Schrägseilen, KIT Karlsruhe, aus: Brückenkolloquium – Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken, 2. Kolloquium 21. und 22. Juni 2016, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, 2016
- [8]: Stempniewski, L., Siegel, S., Möller, J., Kiefer, D.: Verfahren zur Prüfung des Zustands von externen Spanngliedern und Schrägseilen. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2009. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 1025. Herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn, 2009
- [9]: Walther, R.: Schrägseilbrücken. Düsseldorf: Beton-Verlag GmbH, 1994

Prix d'excellence 2017 mention très bien

# WEITERENTWICKLUNG VON KOMPONENTEN EINES ELEKTROSTATISCHEN STAUBABSCHEIDERS FÜR BIOMASSEHEIZSYSTEME UNTER NUTZUNG EINER SPEZIELL DAFÜR ANGEPASSTEN MESSMETHODIK\_

Dennis Hövelmann



\_Abb. 1: Prinzip der elektrostatischen Staubabscheidung [2]



\_Abb. 2: Elektrostatistischer Filter Controller [3]

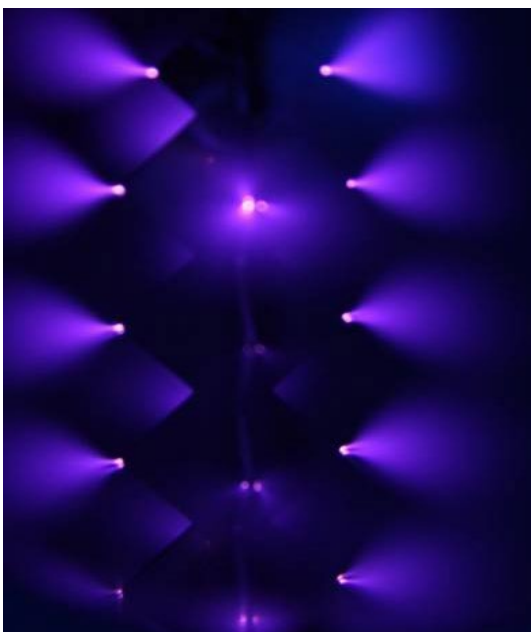
Erneuerbare Energien emittieren grundsätzlich weniger des klimaschädlichen Treibhausgases CO<sub>2</sub> oder sind gegebenenfalls CO<sub>2</sub>-neutral. Diese erneuerbaren Energien weisen jedoch teilweise andere umweltschädigende Emissionen auf, die berücksichtigt werden müssen. Die Feinstaubemissionen aus der energetischen Nutzung von Biomasse bilden aufgrund der gesundheitlichen Folgen eine nicht vernachlässigbare Emissionsquelle und können unter anderem mittels elektrostatischen Staubabscheidern reduziert werden. Dieser Bericht beschreibt die Masterarbeit über die Weiterentwicklung eines elektrostatischen Staubabscheiders, sowie die Anpassung einer dazu notwendigen Versuchsanlage. Zusätzlich wurde eine adäquate Messmethodik mittels Kombination und anschließender Anpassung der Staubmessnormen VDI 2066 und DIN SPEC 33999 definiert.

Das Prinzip der elektrostatischen Abscheidung beruht auf der Aufladung der abzuscheidenden Partikel in einem elektrischen Feld (siehe Abbildung 1). An der Sprühelektrode werden zunächst unterschiedliche Ladungsträger generiert, welche sich im nächsten Schritt an die Partikel anlagern.

Je nach resultierender Ladung der Partikel, werden diese entweder von der positiv gepolten Sprühelektrode oder der negativ gepolten Niederschlagselektrode angezogen. Das System ist so ausgelegt, dass die Partikel überwiegend negativ geladen werden und sich somit vorwiegend zur Niederschlagselektrode bewegen. Damit die Partikel die Niederschlagselektrode erreichen und dort abgeschieden werden können, muss das Verhältnis zwischen der Verweilzeit des Abgases (inklusive Partikel) im Abscheider und der Coulomb-Kraft<sup>1</sup> stimmen. Wobei die Verweilzeit des Abgases über dessen Strömungsgeschwindigkeit im E Abscheider und der Länge des E Abscheiders definiert ist (siehe Abbildung 1).

Je länger die Abscheiderstufe und je kleiner die Strömungsgeschwindigkeit, desto länger ist die Verweilzeit. Während die Strömung die Staubpartikel vertikal durch die Abscheiderstufe fördert, wirkt die Coulomb Kraft in horizontaler Richtung von der Sprühelektrode zur Niederschlagselektrode (in Anlehnung an [1]). Die Voraussetzung für eine sichere Abscheidung ist demnach, dass die Verweilzeit mindestens der Zeit

\_1 Die Coulomb-Kraft beschreibt eine durch unterschiedliche Potentiale (Ladungen) induzierte Kraft. [1]



\_Abb. 3: Sprühelektrode im aktiven Zustand (ausgebildete Koronaentladung) [3]

<u>Mittelwerte</u>	<u>Turbulatorelektrode</u>	<u>Hovalelektrode</u>
<b>Leistung während den Messungen</b>	4,70 [W]	6,00 [W]
<b>Abscheidegrad</b>	66,30 [%]	67,33 [%]
<b>Maximaler Abscheidegrad</b>	ca. 78 [%]	ca. 85 [%]
<b>Standardabweichung Abscheidegrad</b>	7,29	10,47
<b>Rohgasbeladung während den Messungen</b>	25,20 [mg/Nm <sup>3</sup> ]	20,42 [mg/Nm <sup>3</sup> ]
<b>Reingasbeladung während den Messungen</b>	8,72 [mg/Nm <sup>3</sup> ]	6,33 [mg/Nm <sup>3</sup> ]

\_Tab. 1: Vergleich von Turbulator- und Hovalelektrode anhand von Mittelwerten [3]

entspricht die, die Staubpartikel benötigen um von der Sprühelektrode zur Niederschlagselektrode zu wandern. Diese Absetzzeit wird über den Abstand zwischen Sprüh- und Niederschlagselektrode sowie die Wanderungsgeschwindigkeit in horizontaler Richtung bestimmt. Die Wanderungsgeschwindigkeit wird von der Coulomb-Kraft und den entgegenwirkenden Trägheits- und Reibungskräften (Stokes-Bereich<sup>2</sup>) bestimmt.

Das Abscheidersystem besteht aus einer Abscheiderbox, die flexibel in das Abgasrohr zwischen Kessel und Kamin eingesetzt werden kann. Dabei bildet der EFC (Elektrostatischer Filter Controller) das Kernelement des Abscheiders (siehe Abbildung 2). Der EFC generiert die Hochspannung und übernimmt die kesselunabhängige Regelung des Systems mittels der Parameter Strom, Spannung und Abgastemperatur. Abbildung 3 zeigt die Sprühelektrode im aktiven Zustand. Die sogenannte Koronaentladung<sup>3</sup> in Form von blauen Sprühwolken ist deutlich zu erkennen. Der Abscheidegrad wird über die unterschiedlichen Staubbeladungen, vor - und nach dem Abscheider entsprechend der folgenden Formel

bestimmt. Vor dem Abscheider wird das Abgas mit Rohgas und nach dem Abscheider mit Reingas beschrieben (siehe Abbildung 4). Der Abscheidegrad wird demnach aus den Staubbeladungen an den Messstellen 1 und 2 bestimmt. Dieser Messaufbau entsprechend den Anforderungen der VDI 2066 beziehungsweise DIN SPEC 33999 wurde im Rahmen dieser Masterarbeit realisiert.

$$\eta = 1 - \frac{c_{\text{rein}}}{c_{\text{roh}}} \quad [4]$$

In Tabelle 1 sind die Mittelwerte der relevanten Messdaten zum Vergleich von zwei unterschiedlichen Sprühelektroden dargestellt. Die Roh- und Reingasbeladungen unterliegen den typischen, batchver-brennungs- und wetterbedingten Schwankungen, trotzdem sind die Abscheidegrade mit ca. 66% und ca. 67% annähernd gleich. Die mittlere elektrische Leistung an der Hovalelektrode ist mit 6W größer als die mittlere elektrische Leistung von 4,7W bei der Turbulatorelektrode. Höhere Leistungen beschreiben eine intensivere Korona (z.B. aufgrund einer höheren Sprühpunktenanzahl, siehe Abbildung 3) und somit auch ein höheres Abscheidungspotential. Trotzdem sind die

<sup>2</sup> Im Stokes-Bereich liegt ein linearer Zusammenhang zwischen dem Reibungsdruckverlust und der Partikelgeschwindigkeit vor. Dabei liegen die typischen Geschwindigkeiten in der Größenordnung cm/s. Dieser Bereich befindet sich demnach im laminaren Strömungsbereich bei niedrigen Re-Zahlen (strömungsmechanische dimensionslose Kennzahl).  
<sup>3</sup> Eine mögliche Entladungsform eines elektrischen Feldes, beziehungsweise unterschiedlicher Potentiale.



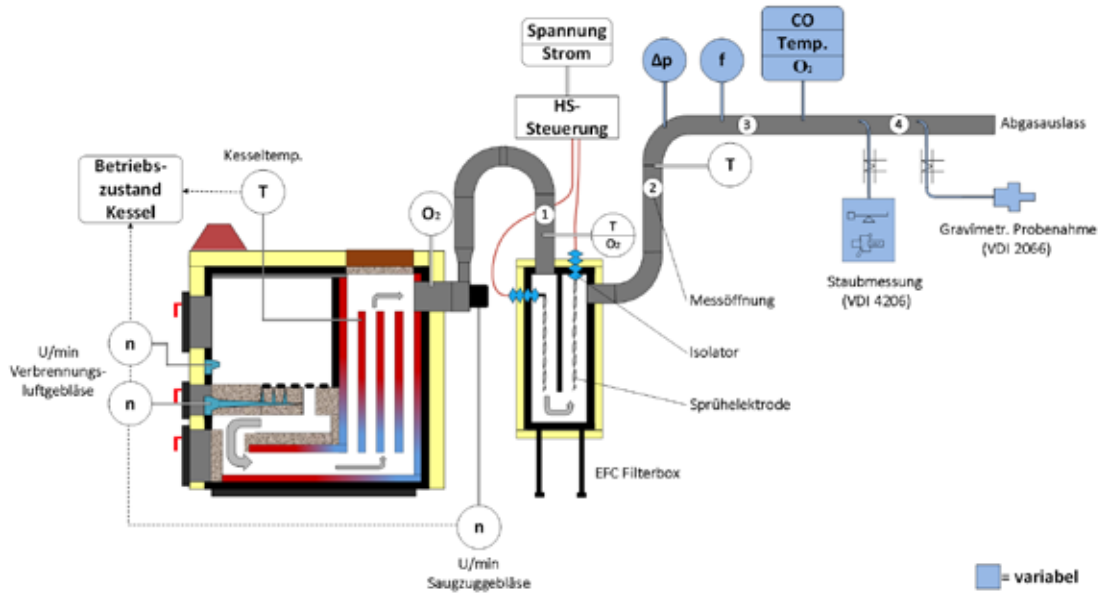


Abb. 4: Aufbau der Testanlage zur Weiterentwicklung des elektrostatischen Abscheiders [3]

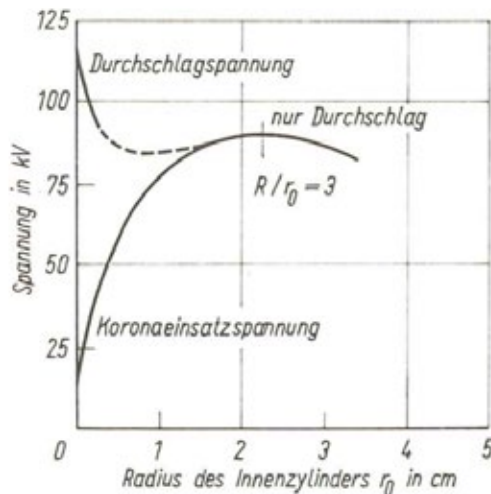


Abb. 5: Zusammenhang zwischen der Koronaspaltung und dem Radius der Sprühelektrode [5]

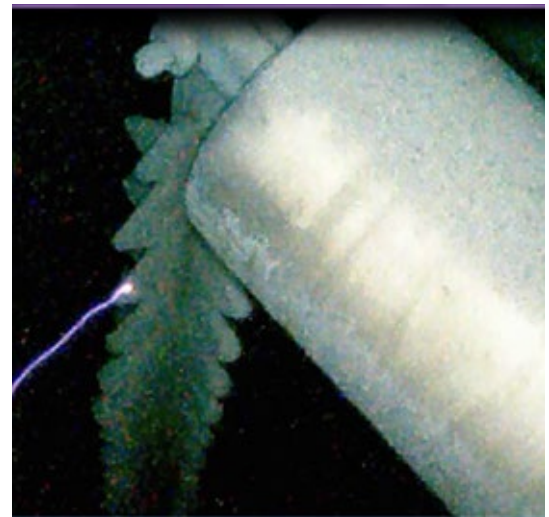


Abb. 6: Bild eines Überschlags im Abscheider [3]

elektrischen Leistungen nach der Einlaufphase bei der Hovalektrode um den Faktor 2 kleiner. Der Mittelwert ist davon abweichend höher, da die Hovalektrode deutlich höhere Anfangsströme hat. Allerdings sind die Staubbelastungen bei der Hovalektrode insgesamt niedriger, sodass auch weniger Staub aufgeladen werden musste. Weiterhin sind die Schwankungen der Abscheidegrade bei der Hovalektrode größer, verglichen mit der Turbulatorelektrode. Dies ist an der deutlich höheren Standardabweichung der Abscheidegrade in Tabelle 1 zu erkennen. Staubanlagerungen an der Sprühelektrode können die Sprühpunkte reversibel inaktivieren, sodass die elektrische Leistung aufgrund von Verschmutzungen in der Regel sinkt. Abschließend wurde die Hovalektrode inklusive einer noch zu entwickelnden Reinigungsvorrichtung als die bessere von beiden bewertet.

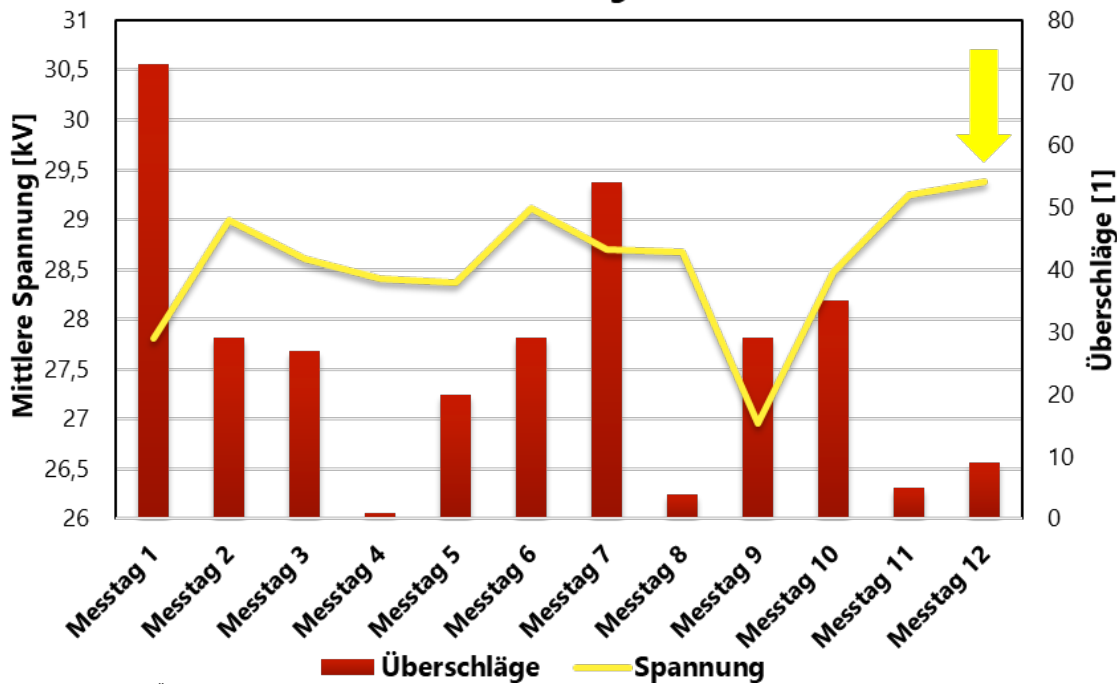
Abbildung 5 verdeutlicht die Charakteristik der Koronaentladung. Die Korona benötigt eine von verschiedenen Faktoren abhängige Mindestspannung (Koronaeinsetzspannung). Daneben ist der Arbeitsbereich der Koronaentladung beziehungsweise des Abscheiders durch die Überschlagsspannung nach oben begrenzt. Je kleiner der Durchmesser der Sprühelektrode, desto größer ist der Arbeitsbereich zwischen Koronaeinsetzspannung

und Durchschlagsspannung. Die kleinen Durchmesser werden in diesem Fall in Form von spitzen Kanten realisiert. Diese Kanten ermöglichen die Ausbildung eines inhomogenen elektrischen Feldes (nicht parallele Feldlinien). In einem homogenen elektrischen Feld ist eine Koronaentladung nicht möglich, da die Koronaeinsetzspannung der Durchschlagsspannung entspricht. Ein Durchschlag ist ein Kurzschluss aufgrund der vollständigen Ionisierung eines Luftkanals (ähnlich eines Blitzes, siehe Abbildung 6) und verhindert den Aufbau eines elektrischen Feldes, sowie die elektrostatische Aufladung von Partikeln. Weiterhin beeinflussen diese Überschläge (oder Durchschläge) die Lebensdauer einzelner Anlagenkomponenten und die EMV<sup>4</sup>. Folglich müssen die Überschläge auf ein Minimum reduziert werden.

Grundsätzlich steigt der Abscheidegrad in diesen Systemen mit der Erhöhung der Spannung im Abscheider. Aufgrund des primären Ziels der möglichst effektiven Staubabscheidung, soll die Istspannung im Abscheider demnach leicht unterhalb der Durchschlagsspannung eingestellt werden. Die Koronaeinsetzspannung, sowie die Durchschlagsspannung sind jedoch nicht stationär. Unterschiedliche Einflussfaktoren, wie die

<sup>4</sup> Elektromagnetische Verträglichkeit (Zulassungsvoraussetzung).

## Gegenüberstellung von Abscheiderspannung und Überschlägen



\_Abb. 7: Bild eines Überschlages im Abscheider [3]

Abgastemperatur, die relative Abgasfeuchtigkeit, die Strömungsgeschwindigkeit oder die Partikeleigenschaften führen zu einer ständigen Variation dieser Schlüsselparameter. Diese Einflussfaktoren können vor allem wegen den Wechselwirkungen nicht direkt in die Regelung übernommen werden, sodass eine experimentelle Suche nach den idealen Regelparametern notwendig war.

Abbildung 7 zeigt die experimentelle Entwicklung eines idealen Kompromisses (siehe gelben Pfeil) innerhalb des Zielkonfliktes zwischen einer hohen mittleren Spannung und gleichzeitig niedrigen Überschlagszahlen. Ein Messtag entspricht ca. 8-10 Betriebsstunden des Abscheiders. Dadurch sind ca. 90% der Kesselbetriebszeit abgedeckt. In den kritischen, sehr instationären Betriebszuständen Anheizen und Ausbrand kann der Abscheider nicht die komplette Phase abdecken. Der Abscheider schaltet ab einer minimalen Abgastemperatur ein und bei Unterschreitung der Ausschalttemperatur<sup>5</sup> wieder ab. Im Fall eines Überschlages wird die Spannung unterbrochen und das elektrische Feld mittels einer definierten Spannungsrampe wieder bis zur Sollspannung aufgebaut. Dieser Vorgang kann zwischen 30 - und 60 Sekunden andauern in denen die Istspannung deutlich unterhalb der Sollspannung liegt. Die Auswahl der mittleren Spannung über die Messtage berücksichtigt diese „nicht aktiven“ Zeiträume und erlaubt somit die Ermittlung der idealen Parametereinstellungen in der Regelung des EFC. Diese Regelung erkennt Überschläge, sowie Überschlagsgefährdete Zustände aufgrund von indirekten Schlüsselparametern. Die Regelung reagiert folglich mit einer vom Betreiber parametrierbaren Sensibilität auf überschlagsgefährdete Zustände. Dazu wird mit einer moderaten und zeitlich begrenzten Reduktion der Spannung der Abstand zur Durchschlagsspannung erhöht.

Dieser Bericht beschränkt sich auf einzelne, kurzgefasste Fragestellungen dieser Masterarbeit und deckt demnach nicht alle behandelten Weiterentwicklungen, Aufgaben und Diskussionen ab.

An dieser Stelle möchte ich all denjenigen danken, die mich während meiner Masterarbeit unterstützt und mit Engagement begleitet haben, insbesondere Prof. Dr. Ing. Sergiy Antonyuk von der TU Kaiserslautern, sowie Dr. Bodo Groß und Alexander Berhardt von der IZES gGmbH.

### Literaturverzeichnis

- [1] H. J. White, Entstaubung industrieller Gase mit Elektrofiltern, Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1969.
- [2] B. Groß, A. Berhardt, „Elektrostatische Staubabscheider,“ Zukünftig Standard für Biomassekessel?, Saarbrücken, 2014.
- [3] IZES gGmbH, Dennis Hövelmann, 2017.
- [4] M. Stieß, Mechanische Verfahrenstechnik II, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.
- [5] F. W. Peek, „Dielectric Phenomen in High Voltage Engineering,“ Mc Graw Hill, p. 3rd edition, 1929 New York.

<sup>5</sup> Um einer Überregelung entgegenzuwirken, liegt die Einschalttemperatur mindestens 4°C über der Ausschalttemperatur.

Traditionally, to determine the construction duration of a building, calculations are based on construction rates, which are not linked to elements of the project, but rather to areas, and nor do they consider the production steps of the elements on a project. In this master's thesis, supervised by Prof. Dr.-Ing. M. Schäfer from the Uni.lu, a method was introduced using an algorithm-based approach to duration calculation by affecting crane times to elements of a case study building. This element-based calculation suits then perfectly a BIM 4D construction simulation.

Prix d'excellence 2017 mention très bien

## BIM, CONSTRUCTION PLANNING AND SITE OPTIMISATION\_

Dany Pereira Figueiredo



\_Fig.1: Construction management system – Milestones of a construction project [Prof. Markus Schäfer]

The realisation of a construction project is often complex and linked to a series of technical challenges. It is not unusual to identify increases in costs and delays in the schedule, only during the construction phase. It is therefore necessary to attach importance to a realistic construction planning. The more realistic the calculation of the construction progress, the more reliable the construction schedule will be, which consequently results in a more accurate planning of material and personal resources, as well as a more precise construction site logistic planning and budget. BIM 4D linked to algorithm-based methodologies for precise construction planning can be the key to achieve more realistic schedules in the future, which will be determined in this master's thesis.




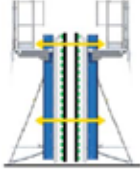
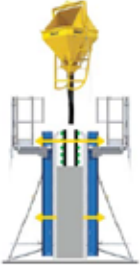

The systematically studying of a construction project's milestones, as shown in Figure 1, was carried on in this master's thesis. The case study project was an office building designed in L-shape, with 9 upper floors and 2 underground floors, and a total area of 11000m<sup>2</sup> of office space. Each wing of the building had a length of approximately 80 meters and a width of 13 meters. Using a BIM-model of

the case study, the aim is to study the operative modus, followed by the elaboration of the work schedule (4D) as function of the crane efficiency, and consequently planning the needed material and personal resources (5D).

In this work, six different methods of construction for the case study building were analysed, particularly regarding construction planning and construction site organisation. The six different constructive options are pre-cast concrete, steel and high added value steel (HAV steel), using always two different layouts for the building. The purpose was to reach the optimisation of the planning, as well as construction site's logistic and installations. Based on the approaches explained below, work cadences, work flow, material and human resources were calculated, and construction site logistics were developed.

A construction installation plan for the most interesting variant was also elaborated. In the end, the construction progress of the various cases analysed was simulated in BIM 4D with the software Navisworks from Autodesk, which not only allows a better visualisation of the construction progress of each variant, but also helped to optimise the work schedule, and validate and oppose the different structural options. This BIM 4D simulation would also allow a better monitoring on building site for the later execution phase. The end result of the work was the comparison of the different construction methods, and also a construction site plan for one of the construction options studied.

Analysing the various working steps in a construction site's production chain is the basic prerequisites for a realistic calculation of a construction schedule. While some processes only rest on manpower deployment, most of the working steps of a construction's structure show a strong dependence on the tower crane (production accessory). This means that the tower crane and his occupancy determinate the working speed on a construction site, and consequently the construction duration. If for every construction element the production steps are standardised and the required crane time defined, the results would be the optimum construction schedule as a function of the crane efficiency. Based on that, the deployment of manpower and the use of material can be planned wise and efficiently. Furthermore, the number of tower cranes needed on site, as well as the construction site installation can be optimised, in order to realise a cost-optimised project within the time scheduled.

Step	1	2	3	4	5	6
	Geometry setting, measuring	Placing and adjusting one formwork panel,	Placing reinforcement, recess, installations (i.e. electricity) and quality check (geometry + reinforcement)	Closing the formwork, formwork anchors, quality check (formwork)	Concreting	Stripping the formwork, curing of concrete
Description						
Human Resource	foreman	form worker, concrete worker	steel fixer, electrician	form worker	concrete worker	concrete worker
Production Accessories	drawings	formwork	recesses	formwork, threader rods	internal vibrator	various
Material Resources	-	-	reinforcement steel bars / welded meshes	-	concrete	-
Crane Use	no	yes	partly	yes	yes	yes

\_Fig.2: Production steps of a wall section [M. Schäfer]

By disassembling a construction project into various individual components (objects), defining specific working step for each object and assigning the appropriate crane time to every production step, the planning of the work schedule, the costs and the construction site can be done through computer-based algorithmic calculations. For this master's thesis, an innovating methodology was used for the construction planning of each studied variant, which was development and is widely applied by major French construction companies. In this methodology, the approaches used for calculations of the construction duration are based on the workload of the crane or cranes on the construction site, with the purpose to optimise to a maximum the effectiveness of those cranes. This means, for a profitable construction site organisation, the cranes should always be in movement and working with a high effectivity. The analysis of the production chains the key of this method.

The used procedure and algorithm for the analysis of construction site organisation and calculation of crane

times was based on approaches developed in France (e.g. Orchestra Chantier / Vinci Construction), and it was further developed last year by Prof. Markus Schäfer as an Excel based VBA program called "ChaCAD". In this work, VBA program "ChaCAD" was used and extended, in which different crane times are embedded for the analysis of structural work based on operational measurement issued from 3D model. To use this methodology based on the effectiveness of the cranes, a breakdown into single components of a building's complex structure was done first. The single components of a building's structure could so be grouped into different categories, i.e. walls, columns, beams, etc. Then, the needed resources (i.e. material) and production accessories (i.e. formwork, scaffold) need to be determined, depending on the chosen construction technology. In addition, the operation tracking of each construction's component was done; this means that the method of how the components would be build should be defined.

As an example, the application of this approach on a concrete wall will be used in this article. The material resources will be



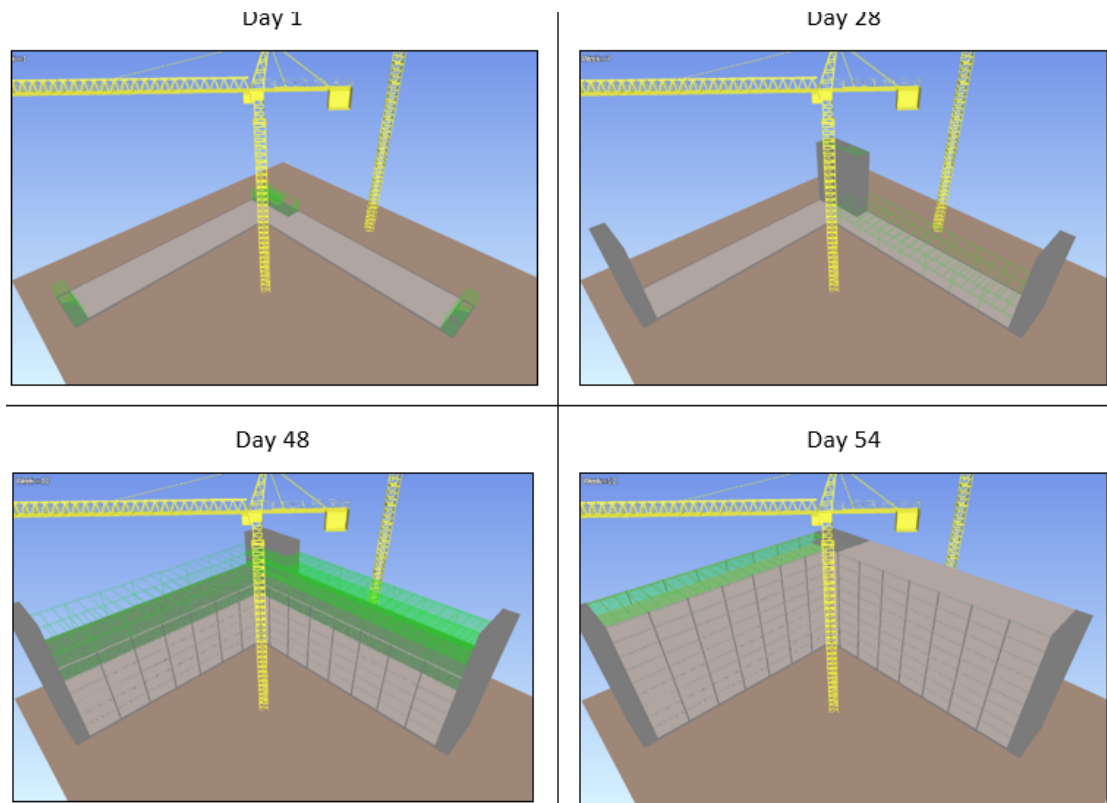


Fig.3: Screenshots from the 4D simulation of a studied case. (Variant 3B with 2 cranes)

concrete, in this case ready-mixed concrete, reinforcement steel in form of steel bars and/or steel mats. In addition, further components could be added i.e. components for electric facilities. Before analysing each working step, the execution procedure must be specified. The erection of the wall could be done in in-situ concrete, with semi precast elements with subsequent in-situ concrete filling or the entire wall could be precast. This decision determines the layout of the construction site installations, but also the structural planning. The chosen construction method often depends on project-based boundary conditions, but also on the construction company's know-how. At this stage, the BIM technologies advantages come really into their own. Due to the cloud based networking capacities between specialised planners concerned by the project, the structural engineer can respond promptly to the needs of the other project-related parties and their requests. Necessary information could be instantaneously shared and the model updated with the required modifications.

The analysis of the production chains is illustrated through the example of a concrete wall. The chosen construction method is in-situ concrete and the production steps are explained in figure 2.

The operation steps show that the successful production of the final product, in this case the concrete wall segment, depends on diverse resources:

- \_personnel deployment, their qualifications and the number of workers on the site
- \_production accessories, these include material and machines which are needed for the production process
- \_raw materials, essentially ready-mixed concrete and reinforcement steel.

It is also apparent that in almost every operation step the tower crane is needed. The construction tower crane is also the crucial machine on a construction site and has the key role in the construction progress. The tower crane has the same significance on a construction site as a robot in the industrial production, for example in the automotive industry.

To achieve the optimum in construction progress, the tower crane must be used to its full capacity; this means the crane should turn and work during the whole day. If the crane runs without noteworthy interruptions, it will let the workers in the area underneath the crane have their maximal working progress speed. In the industry, the time a machine needs to produce one unit of production must

be determined. For a tower crane on a construction site, every single operation step and their respective operating time must be identified. Crane operating times (or cycles) can be determined for every single operation step, from attaching the chains to the hook to the detaching step. These times are obtained by empirical measurements or by means of methods-time measurements.

Afterwards, every single crane operating time of a floor or an area can be added. From the sum results the production time of, for example, a floor. The quantities (running meter concrete wall, square meter slab area, number of beams, number of columns, etc.) divided by the crane operating times results in the daily work rate.

In order to give crane times to every operation steps, data must be available. In France, where this methodology is to some extent known and partly applied, large construction companies have their own crane times' databases. The crane times are obtained by empirical measurements or by means of methods-time measurements. Usually, the companies using this methodology send men on their construction sites to collect the data. Their task is to time the occupation of the crane by each single task.

For each constructive option of the case study in this master's thesis, each component was defined into specific working steps with the given crane times. With the algorithm in ChaCAD, time needed to build a specific element was determined. At the end, each time was added to give the final construction duration of the constructive option. Using a BIM 4D model, the results of ChaCAD could be linked to each element of the structure. Figure 3 shows screenshots of a BIM 4D simulation.

At the end, the results of the comparison between all case studied, showed clearly that the steel variants and the HAV steel variants had a considerable impact on construction site logistics, with a significant reduction of trucks on site in relation to variants without any steel solution. In terms of the construction duration, only a little decrement of the global construction duration was visible.

But when looking only for the construction times of the frame and slab, without considering the construction duration of the concrete cores, that construction of steel solutions was faster. Concerning the number of workers, it doesn't vary much from case to case, being the significant variations, the ones seen between the use of one or two cranes.

Unfortunately, it was not possible to use construction site specific objects in the 4D simulation, as for example scaffoldings, frameworks, or even construction site facilities equipment, mainly because there was no time to model every element, but also because most elements specific the execution material, e.g. frameworks, are yet not available in online object libraries. The use of such elements in the simulation would clearly be beneficial for the visualisation and would probably increment the optimisation level of the schedule and construction site.

Due to lack of time, the cost aspect was not studied in this master's thesis. But a study led by Prof. Schäfer ["Journée Construction Acier : Des bâtiments en construction mixte acier-béton - Une alternative pour les entreprises générales de constructions ?", Luxembourg, Novembre 2015." [s.n.]], in which he compared different constructive options of one building and their respectively resulting construction site logistics and cost, concludes that a variant with a relatively cheap structure building won't be necessarily the cheapest variant, when considering a holistic approach to analyse the global costs of the building (e.g. including façade, interior finishing, building service technic). The cost aspect and the inclusion of façade works could be a further development of this master's thesis.

Furthermore, a lot of research and development must be done to achieve the a real 4D planning. By breaking down a project's fundamental elements (objects), defining for each object their production steps, and giving each production step the right crane time, the calculations of the construction duration and cost, as well as the planning of the construction site, could be done by computer-based algorithmic calculations. Since the main BIM feature is a 3D-object data modelling, the implementation in BIM of the calculation method explained in this master's thesis is the next step. The collecting of relevant data should be component-specific and prepared for data exchange in BIM. Furthermore, the calculation method and data should be implement in BIM itself, for example in open-BIM. A 5D visualisation of the construction progress related to all needed resource should be the aim, which lead to an effective resource and logistics management.

Through a detailed planning and visualisation of the construction progress, a simplified and reliable monitoring of the cost and construction work, as well as a more accurate site logistic management, could be achieved. Subcontractors with an intensive shop and logistic activity, e.g.

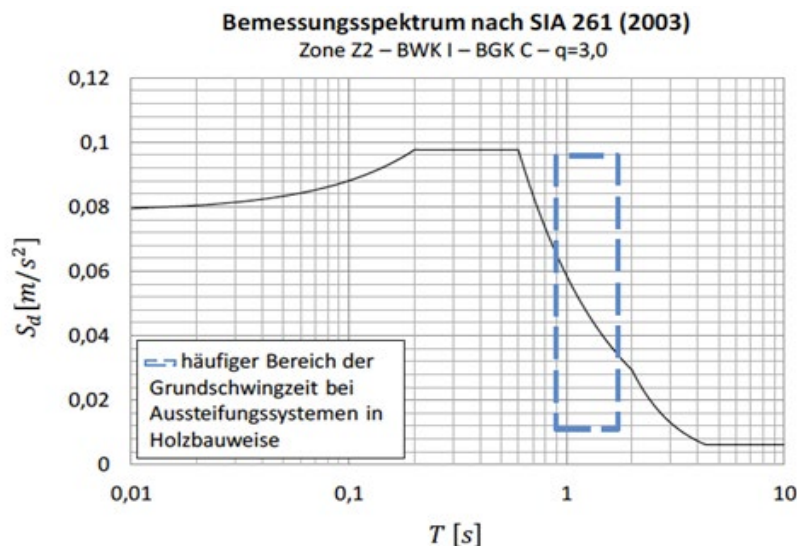
precast elements manufacturers or steel constructors, could profit from the cloud-based BIM by planning and monitoring their delivery on site based on the determined work sequence on site. The use of Radio-frequency identification (RFID) could be considered.

Also, the effective implementation of BIM on construction sites, which must involve all workers and subcontractors on site, might be the next big challenge of the AEC industry.

Prix d'excellence 2017 mention bien

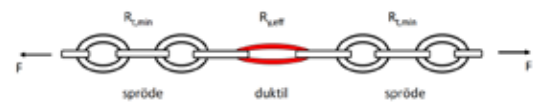
# SEISMISCHE AUSLEGUNG UND BEMESSUNG EINES MEHRSTÖCKIGEN GEBÄUDES IN HOLZBAUWEISE IN DER SCHWEIZ

Michel Faltz



\_Abb. 1: Häufiger Bereich der Grundschiwingzeit von Holzbauten

Seit Inkrafttreten von besser auf den Holzbau abgestimmter Brandschutzvorschriften in der Schweiz im Jahr 2005 und ihrer Ausweitung auf alle Gebäudekategorien ab dem Jahr 2015, eröffnen sich der Holzbauweise immer mehr Aufgabenbereiche. Diese Renaissance birgt neben den vielen Chancen jedoch auch neue Herausforderungen, wie etwa die Erdbebensicherheit mehrgeschossiger Holzbauten. In der Schweiz, ein Land mit geringer bis mittlerer seismischer Aktivität, wurde das Erdbebenrisiko wie anderswo auch bis über die Jahrtausendwende hinweg oftmals unterschätzt oder aus Kostengründen teils komplett ignoriert. Rezente Ereignisse, wie das Erdbeben vom 24. August 2016 in Accumoli, Italien mit fast 300 Toten zeugen von der Bedeutung solcher Naturgewalten und der Wichtigkeit ihrer Berücksichtigung bei der Errichtung und Nachrüstung von Gebäuden. Die Reaktion von Gebäuden unter zyklischen Beanspruchungen wird maßgebend durch die Fundamentalperiode des Bauwerks bestimmt. Je schneller ein Gebäude schwingt, desto höher sind die auf das Gebäude anzusetzenden Erdbebenlasten. Aufgrund der gegenüber Stahlbeton vergleichsweise geringen horizontalen Steifigkeit, lassen sich Holzbauten durch höhere Fundamentalperioden kennzeichnen, was geringere Erdbebenlasten zur Folge hat. Für die Erdbebensicherung von

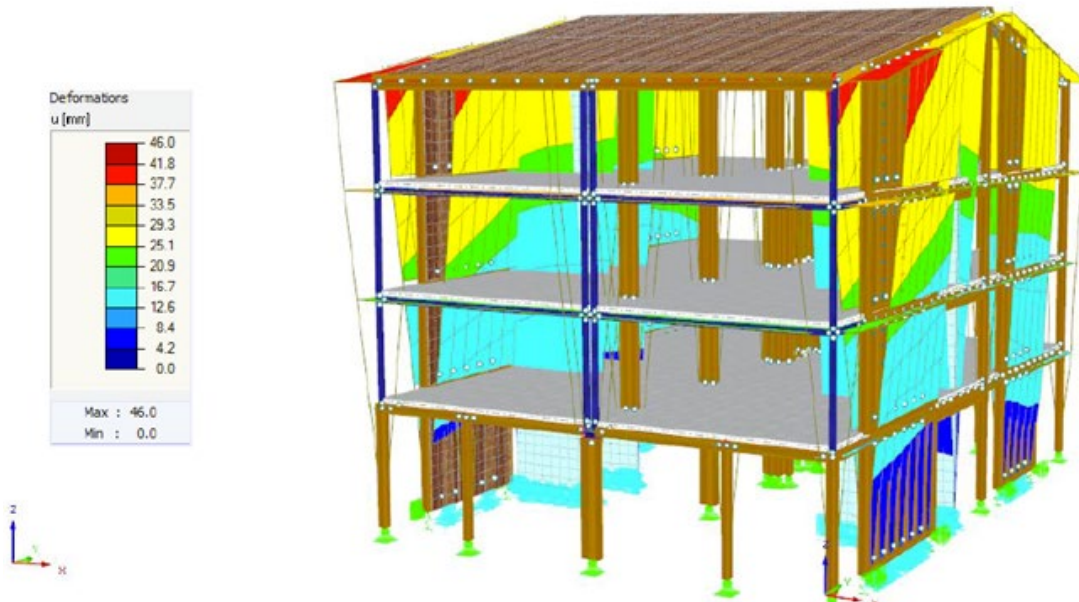


\_Abb. 2: Duktiler Kettenglied

Gebäuden ist das verhältnismäßig geringe Eigengewicht in der Hinsicht von Vorteil, dass bei der horizontalen Stockwerksbeschleunigung geringere Lasten in den Untergrund abzutragen sind.

Der einfachste Ansatz, um die Erdbebenersatzkräfte abzuschätzen, führt über die Wahl des Ordinatenwertes des Plateaus im Bemessungsspektrum. Hierdurch werden die Aussteifungssysteme für eine maximale horizontale Beschleunigung bemessen. Von Vorteil hierbei ist, dass die aufwändigen Berechnungen zur Ermittlung der Grundschiwingzeit entfallen und die Bemessung somit auf der sicheren Seite durchgeführt wird. In der Realität liegen die Grundschiwingzeiten mehrgeschossiger Holzbauten jedoch im Bereich des herabfallenden Astes des Bemessungsspektrums (Abbildung 1). Diese Charakteristik ist auf die geringere horizontale Steifigkeit bei Holzbauten gegenüber konventionellen Stahlbetongebäuden zurückzuführen, so dass eine genauere Ermittlung der Grundschiwingzeit mit geringeren anzusetzenden Erdbebenlasten belohnt wird. Da die Holzelemente ein elastisches Tragverhalten aufweisen, wird das dynamische Verhalten von Holzbauwerken vor allem durch die Anschlüsse bestimmt. Diese müssen ausreichend duktil bemessen werden, damit es nicht zu einem spröden Versagen der Holzbauteile kommt.

Dieser Mechanismus kann anhand einer sogenannten duktilen Kette näher erläutert werden (Abbildung 2): Ein duktiler Kettenglied mit der effektiven Festigkeit  $R_{y,eff}$  schützt die anderen Glieder mit sprödem Bruchverhalten mit minimaler Festigkeit  $R_{t,min}$  solange die Bedingung  $R_{y,eff} < R_{t,min}$  eingehalten ist. Das Glied mit der geringsten Duktilität besitzt den kleinsten Widerstand mit der größten Verformungskapazität. Dies bewirkt, dass die Kraft in den restlichen Gliedern zu jedem Zeitpunkt geringer als jene im duktilen Glied ist und sich die gesamte Kette duktil verhält. In Bezug auf die Holzbauwerke bedeutet dies, dass die Verbindungsmittel in der plastischen Zone ausreichend duktil bemessen werden müssen, damit die Erdbebenenergie abgebaut und ein sprödes Versagen der Holzbauteile im elastischen Bereich vermieden wird.



\_Abb. 3: Auslenkung des Bemessungsgebäudes unter Erdbebeneinwirkung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es ein 4-stöckiges Gebäude in der Schweizer Erdbebenzone 3a beispielhaft sowohl für die traditionellen wie auch für Erdbebenlasten entsprechenden den Normen SIA 261 und SIA 265 auszulegen. Hierfür wurde das Gebäude zunächst nach seismischen Gesichtspunkten hin ausgesteift und die Erdbebenlasten durch statische Ersatzlasten (Ersatzkraftmethode) auf die einzelnen Geschosse verteilt. Hierbei werden zwei unterschiedliche Tragsysteme vorgestellt: Holzrahmenwände und Brettspertholz wände. Kritische Bereiche und Details werden identifiziert und die konstruktive Durchbildung anschaulich dargestellt.

Daran schließt sich eine genauere Untersuchung der Erdbebensicherheit an. Hierbei wird das Gebäude mittels einer FE-Software modelliert und die dynamischen Einwirkungen auf das Gebäude mittels des Antwortspektrenverfahrens näher bestimmen (Abbildung 3). Abschließend werden die Schnittgrößen aus der Vorbemessung mit jenen aus dem Modell verglichen und diskutiert. Hierbei wird deutlich, dass eine geringe Exzentrizität zwischen Masse- und Steifigkeitszentrum schon ausreicht, damit die Bemessung mittels der vereinfachten Ersatzkraftmethode keine zuverlässigen Ergebnisse liefert. Das Gebäude wird somit zu stark auf Torsion beansprucht, so dass für die anschließende Optimierung der Anschlüsse die Schnittgrößen aus dem Modell berücksichtigt werden.

Die Optimierung der Anschlüsse in den Aussteifungswänden erfolgt unter Berücksichtigung der horizontalen Stockwerksauslenkung unter Wind, sowie der Schnittgrößen in den duktilen Anschlüssen aus Erdbeben. Hierbei wird geschossweise die Verformung vom Erdgeschoss bis zum Dachgeschoss begrenzt. Ist einmal die Verformung mit dem gewählten Verankerungssystem eingehalten, so wird mit der nachfolgenden Etage die Verfeinerung fortgeführt. Dabei ist zu beachten, dass für den Fall, wo die Erdbebenlasten im duktilen Tragglied nicht maßgebend sind, eine Verstärkung des Anschlusses eine Reduktion der Fundamentalperiode zur Folge hat und somit der Lastfall Erdbeben wieder entscheidend werden könnte. Wenn die Begrenzung der Verformungen eingehalten ist, ist jedoch von einer solchen Vorgehensweise abzuraten, da hierdurch die Erdbebenlasten unnötig erhöht werden und die Bemessung im Vergleich zu einer elastischen Bemessung unwirtschaftlich wird. Da sich die Stärke eines Erdbebens

nie sicher voraussagen lässt, ist die Reaktion eines Gebäudes auf eine Erdbebeneinwirkung und der zu erwartende Schaden nicht genau vorauszusagen. Eine kräftebasierende Bemessung in Kombination mit einer Kapazitätsbemessung schützt die Bauwerke vor einem Einsturz, erlaubt jedoch keine Aussage über den zu erwartenden Schaden.

Mit dieser Arbeit, welche in enger Kooperation zwischen der RWTH Aachen und der EPFL Lausanne entstand, wurden vor allem die holzbauspezifischen Vorteile bei der Erdbebenbemessung dargestellt, aber auch das Fehlen an Erfahrungen mit neueren Wandsystemen dargestellt. Auch wird die Kapazitätsbemessung bei der Holzbauweise generell in Frage gestellt: Oftmals kann es wirtschaftlicher sein die horizontale Steifigkeit des Gebäudes zu reduzieren und hierdurch die Fundamentalperiode zu erhöhen. Dies hat zur Folge, dass die Erdbebenlasten soweit reduziert werden können, dass eine Windbeanspruchung gegenüber der Erdbebeneinwirkung maßgebend wird und somit die komplexe Kapazitätsbemessung umgangen werden kann.



Untersuchungen in der Vergangenheit haben gezeigt, dass sich schlanke und gedrungene Platten hinsichtlich ihrer Bruchmechanismen beim Durchstanzen unterscheiden. Im Rahmen meiner Masterarbeit habe ich am Institut für Massivbau (IMB) der RWTH Aachen ein bestehendes kinematisches Durchstanzmodell, aus einer vorangegangenen Arbeit, so modifiziert, dass dieses das Durchstanztragverhalten von punktförmig gestützten Platten einheitlich beschreiben kann.

Prix d'excellence 2017 mention bien

# THEORETISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM DURCHSTANZTRAGVERHALTEN PUNKTFÖRMIG GESTÜTZTER PLATTEN

Yann Lotzkes

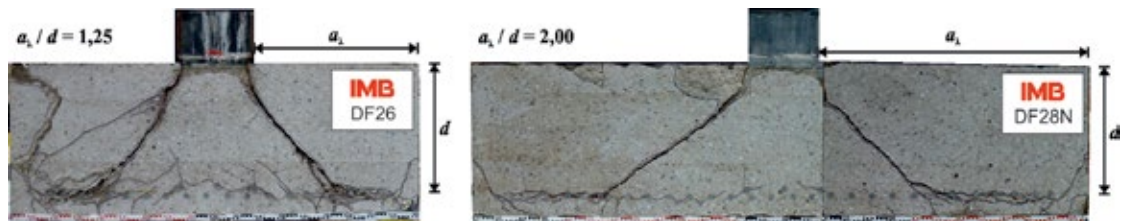


Abb. 1: Sägeschnittsbild von einem gedrungem (links) und einem schlankem (rechts) Fundament [Sib14]

Sowohl bei Flachdecken als auch bei Fundamenten besteht die Gefahr eines Durchstanzversagens. Durchstanzen beschreibt eine lokale Form des Querkraftversagens einer Platte. Infolge einer konzentrierten Lasteinleitung durch eine unmittelbare Auflagerung der Platte auf einer Stütze entsteht durch Querkräfte und negative Biegemomente innerhalb der Platte ein räumlich hochbeanspruchter Bereich. Beim Erreichen der Durchstanztragfähigkeit dringt die Stütze durch die Platte hindurch und stanz dabei einen kegelstumpfförmigen Bereich, den sogenannten Durchstanzkegel, aus der Platte heraus. Bei einem Durchstanzversagen tritt der Bruchzustand insbesondere bei Platten ohne Durchstanzbewehrung ohne deutliche Vorankündigung ein und zählt somit zu den spröden Versagensarten. Die Gefahr, dass ein Durchstanzversagen auftritt, ist dabei allgemein für flächige Bauteile gegeben, die senkrecht zur Ebene eine konzentrierte Lasteinleitung erfahren. [Zil09]

In der Literatur werden verschiedene mechanische Modelle sowie halbempirische Ansätze zur Beschreibung des Durchstanztragverhaltens von Platten vorgeschlagen. Diese erfassen zum Teil eine Vielzahl von Einflussparametern wodurch die Durchstanztragfähigkeit mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden kann. Allerdings wurden diese Modelle überwiegend an symmetrisch belasteten Flachdeckenversuchen hergeleitet. Außerhalb des überprüften Bereichs besitzen diese Ansätze nur eine eingeschränkte Aussagegenauigkeit. Zusätzlich hierzu enthält der bisher gültige Durchstanznachweis nach Eurocode 2, welcher auf der Grundlage eines empirischen Ansatzes geführt wird und bei dem der Widerstand auf dem geometrischen Bewehrungsgrad basiert, zahlreiche Sonderregelungen. Diese gestalten die Anwendung in der Praxis unübersichtlich. Für die nächste Generation des Eurocodes will man daher einen Durchstanznachweis herleiten, der einerseits eine einheitliche und wirtschaftliche Durchstanzbemessung für Flachdecken

und Fundamente ermöglicht und bei dem andererseits die zahlreichen Sonderregelungen entfallen und somit der Praxis gerechter wird.

Darauf aufbauend wurde in einer vorangegangenen Arbeit am Institut für Massivbau der RWTH Aachen ein kinematisches Durchstanzmodell hergeleitet. Allerdings enthält dieses Durchstanzmodell noch gewisse grundlegende Annahmen die keine Allgemeingültigkeit besitzen, wodurch eine einheitliche Beschreibung des Durchstanztragverhaltens von punktförmig gestützten Platten nicht möglich ist. Ziel meiner Masterarbeit war die Modifikation dieses bestehenden kinematischen Durchstanzmodells zur einheitlichen Beschreibung des Durchstanztragverhaltens von punktförmig gestützten Platten.

Das aus meiner Masterarbeit resultierende Durchstanzmodell baut auf insgesamt 4 Traganteilen auf:

- \_Der Traganteil  $V_{CLZ}$  der Critical Loading Zone
  - \_Der Traganteil  $V_{ci}$  der Rissverzahnung
  - \_Der Traganteil  $V_{rd}$  der Nachrisszugfestigkeit
  - \_Der Traganteil  $V_d$  der Dübelwirkung
- Die Durchstanztragfähigkeit ergibt sich folglich aus:

$$V_{ges} = V_{CLZ} + V_{ci} + V_{rd} + V_d$$

Die „Critical Loading Zone“ (CLZ) stellt einen theoretisch angenommenen, hochbelasteten Körper im Lasteinleitungsbereich des Fundamentes oder der Flachdecke dar. Dieser hochbelastete Körper stützt sich infolge der einwirkenden Kräfte zur Stütze hin ab und ermöglicht somit einen Kraftfluss zu der Stütze. Der Traganteil  $V_{CLZ}$  ergibt sich aus dem vertikalen Anteil der im Bruchzustand über die CLZ zur Stütze übertragenen Kräfte, wodurch es sich hierbei also im Grunde um die Querkrafttragfähigkeit der CLZ handelt.

Der Traganteil  $V_{ci}$  der Rissverzahnung beschreibt die zweite Schlüsselkomponente des weiterentwickelten

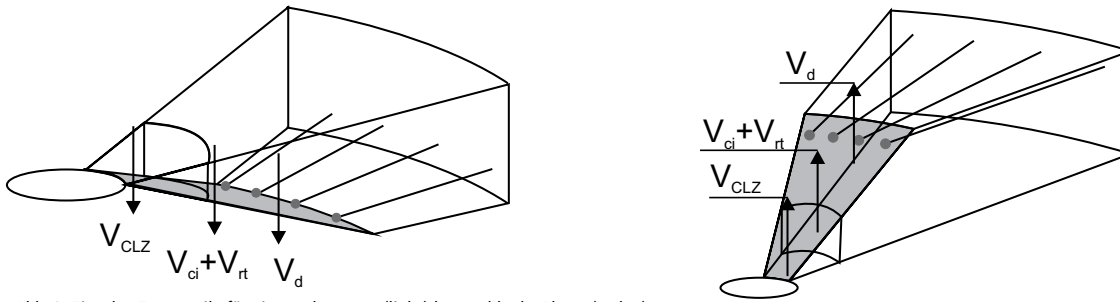


Abb. 2: Einzelne Traganteile für eine gedrungene (links) bzw. schlanke Platte (rechts)

kinematischen Durchstanzmodells. Erreicht ein Plattendragwerk die Durchstanztragfähigkeit, bildet sich ein sogenannter kritischer Schubriss aus (siehe Abbildung 1). Der Traganteil  $V_{ci}$  ergibt sich durch die Kraftübertragung über diesen kritischen Schubriss. Durch die gegeneinander verlaufende Scherbewegung beider rauen Rissoberflächen des kritischen Schubrisses infolge der einwirkenden Durchstanzkraft, verzahnen sich die Betonkörner von beiden Rissoberflächen und es können Kräfte zwischen beiden Rissoberflächen übertragen werden. Aus der Summe der übertragbaren Kräfte über den kritischen Schubriss ergibt sich schlussendlich der Traganteil  $V_{ci}$ .

Betrachtet man die Spannungs-Verformungskurve eines reinen Zugversuchs an einem Kleinkörper, so erkennt man den abfallenden Ast der Spannungs-Verformungskurve nachdem die Bruchlast des Kleinkörpers erreicht worden ist. Dieser abfallende Ast der Spannungs-Verformungskurve beschreibt die sich aus der Zugbelastung im Kleinkörper ergebende Spannung, nachdem sich ein Riss auf der Makro-Ebene des Körpers gebildet hat. Bei zunehmender Verformung des Betonkörpers fällt diese Zugspannung innerhalb des Betonkörpers ab. Die Zugspannung wird nach [Hor91] durch das Herausziehen der Körner aus der Zementsteinmatrix der gegenüberliegenden Rissfläche begründet und resultiert somit aus der Reibung zwischen den Körnern und der Zementsteinmatrix bzw. aus Adhäsion. Der Traganteil  $V_{rt}$  resultiert aus dieser Zugspannung infolge Nachrisszugfestigkeit, die sich für kleine Rissbreiten des kritischen Schubrisses ergibt.

Der Traganteil  $V_d$  der Dübelwirkung beschreibt den Traganteil, der sich aus der Biegezugbewehrung der Platte ergibt. Bildet sich ein kritischer Schubriss in der Platte aus, so reißt die Platte auf, wobei die Biegezugbewehrung jedoch bestehen bleibt und somit die beiden Rissufer des kritischen Schubrisses verbindet. Man spricht hier also von einer Verdübelung beider Rissufer. Es werden zwei Versagensformen für den Traganteil der Dübelwirkung unterschieden. Die erste Versagensart beschreibt das Versagen der Biegezugbewehrung an sich. Bildet sich ein Fließgelenk infolge der einwirkenden Kräfte in der Biegezugbewehrung aus, so ist die Traglast infolge Dübelwirkung erreicht. Traglastbestimmend wird somit die Biegetragfähigkeit der Biegezugbewehrung. Die zweite Versagensform beschreibt das Abplatzen des

Betons bei geringer Betondeckung. Es bildet sich in der Ebene der Bewehrung ein fortschreitender Riss, der sogenannte Dübelriss, welcher eine Abspaltung der Betondeckung verursachen kann. Infolge der Rissuferverschiebung des kritischen Schubrisses wird die Betondeckung infolge der Dübelkraft belastet. Diese Belastung wird dann über Betonzugspannungen nach oben gehängt, wodurch die Tragfähigkeit aufgrund der Betonzugfestigkeit bestimmt wird. [Zil09]

Alle 4 Traganteile sind dabei von der mittleren Bewehrungsdehnung  $\epsilon_{t,avg}$  abhängig. Zur Bestimmung der Durchstanztragfähigkeit einer Platte wurde ein iterativer Lösungsprozess gewählt, bei dem die mittlere Bewehrungsdehnung  $\epsilon_{t,avg}$  iterativ gesteigert wird bis ein Gleichgewichtszustand gefunden wird. Mit Hilfe des entwickelten kinematischen Durchstanzmodells wurde anschließend die Durchstanztragfähigkeit von insgesamt 27 Fundamentversuche und 22 Flachdeckenversuche ohne Durchstanzbewehrung näher untersucht. Hierbei ergab sich ein Mittelwert für das Verhältnis der experimentell ermittelten Durchstanztragfähigkeit zu der aus dem Modell resultierenden Durchstanztragfähigkeit von 1,0 bei einem Variationskoeffizienten von 0,1. Es kann also davon ausgegangen werden, dass das kinematische Durchstanzmodell das Durchstanztragverhalten von punktförmig belasteten schlanken, sowie gedungenen, Plattenbauteilen realitätsnah bei geringer Streuung beschreiben kann. Daraus lässt sich ableiten, dass das kinematische Durchstanzmodell eine einheitliche Beschreibung von punktförmig belasteten Platten ermöglicht.

#### Quellen

[Hor91]: Hordijk, D.A.: Local approach to fatigue of concrete. Dissertation, Delft University of Technology, October 1991.

[Sib14]: Siburg, C.: Zur einheitlichen Bemessung gegen Durchstanzan in Flachdecken und Fundamenten, Dissertation, Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen, 2014.

[Zil09]: Zilch K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. ISBN 978-3-540-70637-32., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer, 2009.



# HORS SERIE

# REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

HORS SERIE DE LA REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE # 014

