



sous l'égide
de la Fondation de
Luxembourg

PRIX D'EXCELLENCE 2018 | 2019





PREFACE_

Lauréats Prix d'excellence 2018

Chères lectrices, chers lecteurs,

La fondation Enovos, créée en 2010, soutient depuis son début les initiatives dans le domaine de la protection de l'environnement et des énergies renouvelables.

Ces sujets ont encore gagné en importance et actualité ces derniers mois.

Une des priorités de nos gouvernements, mais aussi de chacun de nous devra être la réduction des émissions de CO₂ par une amélioration de l'efficacité énergétique et par un changement important dans nos habitudes que ce soit dans le transport, les loisirs ou encore dans notre façon de nous nourrir.

Un changement important sera également nécessaire dans le domaine de l'industrie. Celle-ci devra réduire ses émissions dans tous ses processus industriels et ceci ne sera possible que moyennant l'introduction de nouvelles technologies.

Dans ce domaine on aura besoin de chercheurs et d'ingénieurs qui travailleront main dans la main pour trouver les solutions techniques nécessaires à ce changement important.

En tant que Président de la fondation Enovos je suis donc très content de pouvoir soutenir et récompenser les études d'ingénieur par ce "Prix d'excellence" de la fondation Enovos.

Ce prix s'inscrit dans l'esprit de la fondation Enovos en faveur du progrès des sciences et nouvelles technologies permettant de réussir le challenge que pose le réchauffement climatique.

Ensemble avec l'ANEIL (Association Nationale des Etudiants Ingénieurs Luxembourgeois), la fondation Enovos récompense chaque année les meilleurs travaux de Master de jeunes ingénieurs avec un prix dote de 2500€ par lauréat. Dans cette brochure vous découvrirez les travaux des 6 lauréats primés en 2018, ainsi que les 6 lauréats de 2019. Vous pourrez juger par vous-même de l'excellence et de l'intérêt de ces travaux. Bonne lecture à tous.

Jean Lucius

Président de la Fondation Enovos, sous l'égide de la Fondation de Luxembourg



Lauréats Prix d'excellence 2019

Les éditions 2018 et 2019 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.

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

Les travaux de fin d'études présentés lors de ces deux sessions représentent et visualisent seulement une partie de la panoplie des domaines d'activités de l'ingénieur. La diversité est très grande.

Ceci va de la simulation entièrement réalisée sur ordinateur jusqu'au candidat dont une partie du travail de fin d'études se passe au laboratoire d'essais

des matériaux, du travail de l'ingénieur classique comme l'ingénieur électronicien et agronome, l'ingénieur en mécanique ou en génie civil jusqu'au travail qui est associé à la médecine en passant par les nouvelles technologies, la biologie et les sciences de l'environnement.

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 Luxembourgeoise 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. Nico Binsfeld, Thierry Flies, Olivier Georges, Laurent Heinen, Guy Hoss, Pierre Mangers et Philippe Osch pour leur engagement au sein du jury.

Michel Pundel
Président du jury

INDEX_

02_	PREFACE	Jean Lucius, Président de la Fondation Enovos, sous l'égide de la Fondation de Luxembourg
03_		Michel Pundel, Président du jury
06_	2018	THERMISCHE BEHAGLICHKEIT IM AUTOMATISIERTEN WOHNRAUM Carole Binsfeld
10_		DESIGN CONSIDERATIONS FOR THE ENHANCEMENT OF HUMAN COLOR VISION BY BREAKING BINOCULAR REDUNDANCY Michel Frising
14_		GEBÄUDE IM MATERIALFLUSS - NACHWACHSENDE ROHSTOFFE IN EINEM REALISIERTEN GEBÄUDE IN LUXEMBURG – EINE ZUKUNFTSPERSPEKTIVE? Annouk Godelet
18_		DEVELOPMENT OF A FORCE-AUGMENTING SELF-STABILISING WHEELCHAIR Marc Meyers & Bob Hoffmann
22_		SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF STEEL MRFS DESIGNED WITH PREQUALIFIED BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS IN EUROPE Claire Kox
26_		KINETIK- UND GLEICHGEWICHTSBETRACHTUNG VON SILBER IM SIO ₂ -CAO-AL ₂ O ₃ -SCHLACKENSYSTEM Leonel Pereira
30_	2019	USAGE OF INTER-SITE ELECTROMAGNETIC TRANSFER FUNCTIONS IN EXPLORATION FOR GEOTHERMAL RESOURCES: A 3D SYNTHETIC STUDY Marthe Faber
34_		FUNKTIONSMUSTERERSTELLUNG EINES SYSTEMS ZUR INTERMITTIERENDEN PNEUMATISCHEN KOMPRESSION Yann Faber
38_		ANWENDUNGSFÄLLE ZUR KOPPLUNG VON NIEDERSPANNUNGSNETZEN Max Hamilius
42_		PREDICTING DAMAGE ACCUMULATION IN CARBON-FIBRE COMPOSITES UNDER CYCLIC LOADING Alex Mersch
46_		ENTWICKLUNG EINES HOCHLEISTUNGSFÜGEVERFAHRENS DURCH KOMBINATION EINES UNTERPULVER- UND PLASMASCHWEISSVERFAHRENS Michel Reisch
50_		FUTURE OF STEELMAKING - OUTLOOK TO 2050 Michelle Salmon



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"
- #014 Prix d'excellence 2016 - 2017 - Fondation de Luxembourg
- #015 Châteaux d'eau
- #016 Neues Bürogebäude - Energiekonzept und Nachhaltigkeit - Goblet Lavandier
- #017 Prix d'excellence 2018 - 2019 - Fondation de Luxembourg

REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

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

Graphisme Jan Heinze (janheinze@gmx.net)

Thermischer Komfort in Innenräumen ist von entscheidender Bedeutung für das allgemeine Wohlbefinden des Menschen. In einem automatisierten Wohnraum besteht die Möglichkeit, die Raumtemperatur auf die individuellen Nutzerbedürfnisse abzustimmen und mithilfe einer dynamischen Heizungsregelung ein optimales thermisches Umfeld zu schaffen.

Prix d'excellence 2018

THERMISCHE BEHAGLICHKEIT IM AUTOMATISIERTEN WOHNRAUM_

Carole Binsfeld

Einleitung

Gebäude werden für Menschen gebaut, daher ist ein zentraler Bestandteil eines jeden Gebäudekonzeptes die Kenntnis darüber, was die Menschen als behaglich empfinden (Frohn & Ranft, 2004). Von entscheidender Bedeutung für das Wohlbefinden im Inneren eines Gebäudes ist die thermische Behaglichkeit (Benzinger & Mayer, 1986). Dabei handelt es sich um eine subjektive Empfindungsgröße, denn der Zustand der thermischen Behaglichkeit kann als die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung verstanden werden (Mayer, 1989; Benzing & Mayer, 1986). Diese Zufriedenheit bedeutet, dass eine Person in einem Raum, bei einer gegebenen Tätigkeit, keine Änderung der physikalischen Parameter (Lufttemperatur, Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte) sowie der Bekleidung wünscht (Benzinger & Mayer, 1986).

In Zukunft soll, in einem Smart Home, die Raumlufttemperatur mit Hilfe üblicher Heizungssysteme, wie einer Fußbodenheizung, die an ein Smart Home angekoppelt wurde, so reguliert werden, dass der Bewohner für jede gegebene Bekleidungskombination und Aktivität dieses Gefühl der Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung verspürt. Bei einem Smart Home handelt es sich um ein Zuhause, welches intelligent genug ist, den Bewohnern mittels Technik ein komfortables Leben zu ermöglichen. Ein derartiges Zuhause kennt die Bedürfnisse der Nutzer oder kann diese individuell erfassen und dementsprechend darauf reagieren. Somit ist die Grundvoraussetzung für ein Smart Home die Schaffung eines interaktiven Raumes, in dem alle mechanischen und digitalen Geräte miteinander verbunden sind, um miteinander und mit dem Benutzer zu kommunizieren (Satpathy, 2006; Aldrich, 2003). Den Anwendungsmöglichkeiten zur Einbindung jeglicher in einer Wohnung befindlicher Geräte in ein Gebäudeautomatisierungssystem sind nahezu keine Grenzen mehr gesetzt. Die wichtigsten Funktionen eines intelligenten Zuhauses lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- _Komfortfunktion
- _Gesundheitsfunktion
- _Energiemanagementfunktion
- _Multimediafunktion
- _Sicherheitsfunktion

Die Regulierung des Raumklimas und das damit verbundene Gefühl der thermischen Behaglichkeit vereint die Komfort-

mit der Gesundheitsfunktion und kann zusätzlich, durch eine eventuell eintretende Energieeinsparung, einen Beitrag zur Energiemanagementfunktion leisten. Zur Schaffung eines für den Bewohner optimalen Raumklimas müssen sämtliche, für das Raumklima relevante Einflussgrößen mit Sensoren innerhalb der Wohnung erfasst werden. Zusätzlich muss die individuelle Bekleidung sowie die in dem jeweiligen Augenblick durchgeführte Aktivität erfasst werden können.

Stand der Technik

Der jetzige Umgang mit der thermischen Behaglichkeit, sowie der Erfassung der getragenen Bekleidung und der durchgeführten Aktivität, im automatisierten Wohnraum erfolgt größtenteils anhand von Nutzerprofilen. Dabei wird zum Beispiel erfasst, zu welchen Tageszeiten der Nutzer zu Hause ist und welche Temperaturvorlieben er hat (lieber wärmer oder kühler). So kann das Smart Home mithilfe der Erfassung aller physikalischen Größen im Raum eine Temperatur einstellen, von der das System denkt, dass diese vom Nutzer als thermisch behaglich empfunden wird. Ändert der Nutzer selbstständig etwas an der vom System eingestellten Temperatur, so wird die Änderung aufgezeichnet und beim nächsten automatischen Einstellen einer Temperatur wird diese dementsprechend angepasst. Das System lernt sozusagen auf der Grundlage von Gewohnheitsprofilen welcher Temperaturbereich für den Nutzer thermisch behaglich ist (Vazquez & Kastner, 2012). Ein solches Nutzerprofil hilft dem System, welches das Raumklima reguliert, in Situationen in denen es eine Entscheidung treffen muss, zum Beispiel ob die aktuelle Temperatur für den Raumnutzer angenehm ist oder nicht (Vazquez & Kastner, 2010). Bei dieser Vorgehensweise wird weder die individuell getragene Bekleidung noch die tatsächlich durchgeführte Aktivität berücksichtigt.

Andere Ansätze versuchen die jeweilige Aktivität anhand von Bewegungssensoren quasi zu erraten. Dabei kann festgestellt werden ob sich eine Person derzeit im Raum fortbewegt und mithilfe der Bewegungsgeschwindigkeit ein Energieumsatz berechnet werden. Bewegt sich die von einem Sensor erfasste Person, über einen längeren Zeitraum in einem Raum, nicht kann anhand von typischen Aktivitäten für diesen Raum mithilfe der in der ISO 8996 eingetragenen Energieumsätze für einzelne Aktivitäten der Energieverbrauch bestimmt werden. Befindet sich beispielsweise eine Person zu einer

bestimmten Uhrzeit über einen längeren Zeitraum im Schlafzimmer, kann das System davon ausgehen, dass die Person schläft und somit einen Energieumsatz von 0.8 met (46W/m^2 Körperoberfläche) ermitteln (Kim, Lee & Lee, 2016).

Dahingegen gibt es derzeit keinen Ansatz der die individuell von einer Person getragene Kleidung berücksichtigt. Die getragene Bekleidung ist jedoch entscheidend für das thermische Wohlbefinden einer Person in einem Raum, da diese im Prinzip die Wärmeisolierung zwischen dem Körper und der Umgebung darstellt. In den heutigen Ansätzen zur Temperaturregulierung in einem Smart Home wird diese lediglich mit saisonalen Mittelwerten berücksichtigt beispielsweise 0.5 clo ($=0.08 \text{ (m}^2 \text{ °C/W)}$) im Sommer und 0.8 clo ($=0.12 \text{ (m}^2 \text{ °C/W)}$) im Winter.

Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, eine thermisch behagliche Raumlufttemperatur in Abhängigkeit der individuellen Bekleidung und Aktivität zu ermitteln. Diese ermittelte Raumlufttemperatur soll in Zukunft die Heizung in einem Smart Home regulieren. Dieses soll dementsprechend nutzerindividuell sein und neben der Bekleidung und der Aktivität, die Temperaturpräferenzen sowie die physiologischen Größen eines Menschen berücksichtigen (Alter, Geschlecht, Gewicht). Des Weiteren soll es sich dabei um ein dynamisches System handeln, in dem die Raumlufttemperatur bei etwaigen Veränderungen der relevanten Parameter sofort angepasst wird.

Zur Umsetzung der vorliegenden Zielsetzung muss eine Möglichkeit gefunden werden, die die Berechnung einer thermisch behaglichen Raumlufttemperatur erlaubt. Die Behaglichkeit wird abweichend zu üblichen Beschreibungen einer komfortablen Temperatur (bspw. ausgedrückt als empfundene Temperatur) wegen der Schnittstelle zu den Heizungssystemen in Form der Raumlufttemperatur bestimmt. Denn übliche Steuerungen für Heizungssysteme verwenden als Regelgröße die Raumlufttemperatur. Hinzu kommt, dass sich diese Größe durch Ansteuerung eines Heizsystems sehr schnell verändern lässt. Die vorherrschende Strahlungstemperatur lässt sich beispielsweise kaum oder nur sehr träge einstellen.

Zudem muss jeweils eine Möglichkeit gefunden werden, um die individuelle Bekleidung sowie die Aktivität der Person im Raum zu erfassen, ohne diese in ihrem Wohlbefinden negativ zu beeinträchtigen. Die Zielsetzung beinhaltet ebenfalls die Einbindung der gefundenen Ermittlungsmethoden in ein Smart Home System, welches in einem nächsten Schritt mit der Temperaturregulierung im Raum verbunden werden. Dies wurde in einem ersten Schritt für eine Testwohnung mit nur einer darin befindlichen Person umgesetzt.

Methodik

Der erste Schritt zur Lösung des vorliegenden Problems ist die Findung einer Methode die es erlaubt eine behagliche Raumlufttemperatur zu berechnen. Die Grundidee, um dieses Ziel zu erreichen, besteht darin, einen passenden Index auszuwählen, dessen Funktion die Bewertung einer thermischen Umgebung ist und mithilfe einer mathematischen Umformulierung dieses Indizes eine thermisch behagliche Lufttemperatur bestimmen zu können.

Dazu wurden diverse Indizes in Betrachtung gezogen, die eine Aussage über die thermische Behaglichkeit ermöglichen. Aufgrund der großen Bekanntheit wurde letztendlich das Predicted Mean Vote-Verfahren (PMV), zur Berechnung einer thermisch behaglichen Lufttemperatur in Abhängigkeit der individuellen Bekleidung und Aktivität, ausgewählt. Wohlbermerkt wurden noch weitere Indizes identifiziert, die die Berechnung einer solchen Lufttemperatur ermöglichen. Anhand der unterschiedlichen Berechnungsverfahren kann der automatisierte Wohnraum zusätzlich

individualisiert werden, indem ein Verfahren ausgewählt wird, das Lufttemperaturen berechnet, die den Nutzervorlieben entsprechen. Präferiert der Nutzer beispielsweise ein kühleres Klima, wird die Raumlufttemperatur mit einem Index berechnet, das im Vergleich zu den anderen, unter den gleichen Randbedingungen, niedrigere Temperaturen berechnet.

Das PMV-Verfahren das ursprünglich von Fanger (1970) aufgestellt wurde, basiert auf der Energiebilanzgleichung des menschlichen Körpers. Das Verfahren wurde zur Bewertung einer thermischen Umgebung in die ISO 7730 aufgenommen. Die PMV Berechnung erlaubt es die thermische Umgebung anhand einer Skala, aufgeteilt in 7 Stufen von heiß über neutral bis kalt zu bewerten. Wird das Klima als neutral bewertet, ergibt sich ein PMV von null.

$$PMV = [0.303e^{(-0.036 \times M)} + 0.028] \{ (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} [5733 - 6.99(M - W) - p_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} M(5867 - p_a) - 0.0014M(34 - T_a) - 3.96 \times 10^{-9} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a) \}$$

Mit M	Energieumsatz [W/m ²]
W	wirksame mechanische Leistung [W/m ²]
Icl	Bekleidungsisolierung [m ² K/W]
fcl	Bekleidungsflächenfaktor [-]
Ta	Lufttemperatur [°C]
Tr	mittlere Strahlungstemperatur [°C]
va	relative Luftgeschwindigkeit [m/s]
pa	Wasserdampfpartialdruck [Pa]
hc	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]
Tcl	Oberflächentemperatur der Bekleidung [°C]

Dementsprechend ist das Ziel die Bestimmung einer Raumlufttemperatur, die unter den vorhandenen klimatischen Bedingungen des Raumes, sowie der Berücksichtigung der Kleidung und der Aktivität einen PMV von null ergibt. Die ursprüngliche Formel zu Berechnung des PMV wird, unter der Bedingung, dass der PMV genau null ist, nach der Lufttemperatur umgestellt. Da sowohl zur Berechnung der Bekleidungsoberflächentemperatur, des Dampfdruckes als auch des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten die Lufttemperatur benötigt wird, wird ein iterativer Lösungsprozess genutzt. Zur erstmaligen Bestimmung dieser drei Größen wird die aktuelle Raumlufttemperatur genutzt somit kann eine erste Temperatur unter der Annahme, dass der PMV = 0 ist, errechnet werden. Anschließend werden der Übergangskoeffizient, die Oberflächentemperatur und der Dampfdruck mit der ermittelten Temperatur neu berechnet. Im Anschluss wird dann mit dem gewöhnlichen PMV-Verfahren überprüft, ob die berechnete Lufttemperatur unter Berücksichtigung der tatsächlich im Raum vorherrschenden klimatischen Parametern die folgende Bedingung erfüllt.

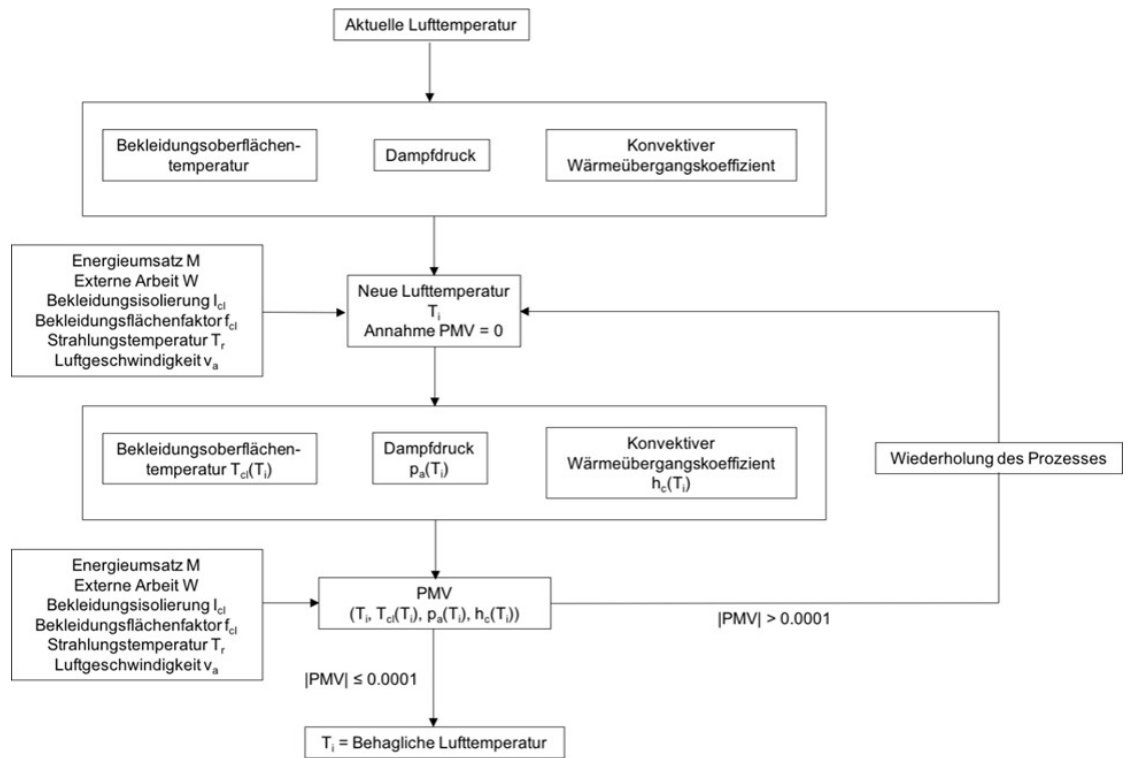
$$|PMV| \leq 0.0001$$

Die Bedingung wurde ausgewählt, da Fanger (1970) angegeben hat, dass bei einem PMV von null, 5% der Personen in einen Raum das Raumklima als thermisch unbehaglich bewerten. Dazu wird der Predicted Percentage of Dissatisfied berechnet. Wird diese Bewertungsgröße nun mit einem PMV von 0.0001 berechnet, ergibt sich ebenfalls ein PPD von 5%, ein besseres Ergebnis kann daher nicht erzielt werden.

Zum verbesserten Verständnis des Berechnungsprozesses soll die folgende Darstellung dienen.

Diese Berechnungsmethode lässt sich ohne weiteres in Matlab programmieren und kann daher in einem Hausautomationssystem genutzt werden. Dazu müssen die aktuelle Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit, die Strahlungstemperatur sowie die Luftgeschwindigkeit im Raum bekannt sein. Diese Größen können in einem Smart Home mittels Sensoren bestimmt werden. Daneben müssen die getragene Bekleidung und die Aktivität, respektiv der Energieumsatz der Person bekannt sein.

Deswegen wurde in dem nächsten Schritt eine Methode gefunden, die die Bestimmung der individuell getragenen Bekleidung erlaubt. Die Ermittlung dieser Berechnungsgröße soll mithilfe eines Radio Frequency Identification (RFID) Systems erfolgen. Bei dieser Technik kommunizieren einzelne Transponder und ein Lesegerät



über Radiowellen. Wie groß die Distanz ist, bei welcher die beiden Komponenten miteinander kommunizieren können, hängt vom Frequenzbereich des jeweiligen Systems ab. Zur Durchführung der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde ein System gewählt, das im Ultrahoch-Frequenzbereich arbeitet und die Kommunikation bis zu einer Distanz von fünf Metern ermöglicht. Die Transponder, welche mit einem Chip und einer Antenne ausgestattet sind, können in die einzelnen Kleidungsstücke eingenäht werden. Das Lesegerät ermöglicht es nun die mit Transpondern ausgestattete Kleidung einer Person zu erfassen. Dementsprechend kann beispielsweise an jeder Tür, die einen Raum mit einem anderen verbindet, ein solches Lesegerät angebracht werden. Dadurch weiß das Hausautomationssystem zu jedem Zeitpunkt, welche Kleidung die sich im Raum befindliche Person trägt. Jeder dieser Transponder ist mit einem einzigartigen elektronischen Produktcode (EPC) beschrieben. Jedes einzelne Kleidungsstück wird in einer Datenbank erfasst, wobei der EPC einem, dem Kleidungsstück entsprechenden, clo-Wert zugeordnet wird. Diese clo-Werte können beispielsweise der ISO 9920 entnommen werden. Anhand der einzelnen clo-Werte der Bekleidung kann nun mittels einem auf dem Server gespeicherten Matlab-Skript der clo-Wert der gesamten Bekleidungskombination berechnet werden.

$$I_{cl} = 0.835 \times \sum I_{clu} + 0.161$$

Um die berechneten clo-Werte zu überprüfen, wäre eine Kopplung des Systems mit einer Wärmebildkamera denkbar. Da das RFID-System nicht unterscheidet, ob eine Person die Kleidung tatsächlich trägt oder diese beispielsweise nur in der Hand hält. Mithilfe der Wärmebildkamera könnte sowohl die Hauttemperatur, als auch die Bekleidungsoberflächentemperatur bestimmt werden. Diese beiden Größen erlauben es theoretisch ebenfalls den clo-Wert der getragenen Bekleidung zu bestimmen (Lee et al. 2016).

Im letzten Schritt geht es um die Bestimmung der metabolischen Rate, die zur Berechnung der Lufttemperatur benötigt wird. Die metabolische Rate hängt von der jeweils ausgeführten Aktivität ab und beschreibt den Energieverbrauch (Wärmeabgabe) einer Person. Die metabolische Rate wurde für die bisherigen Berechnungen der thermischen Behaglichkeit stets mit Standardwerten für einzelne Aktivitäten, welche der ISO 8996 entnommen werden können, angenommen. Da

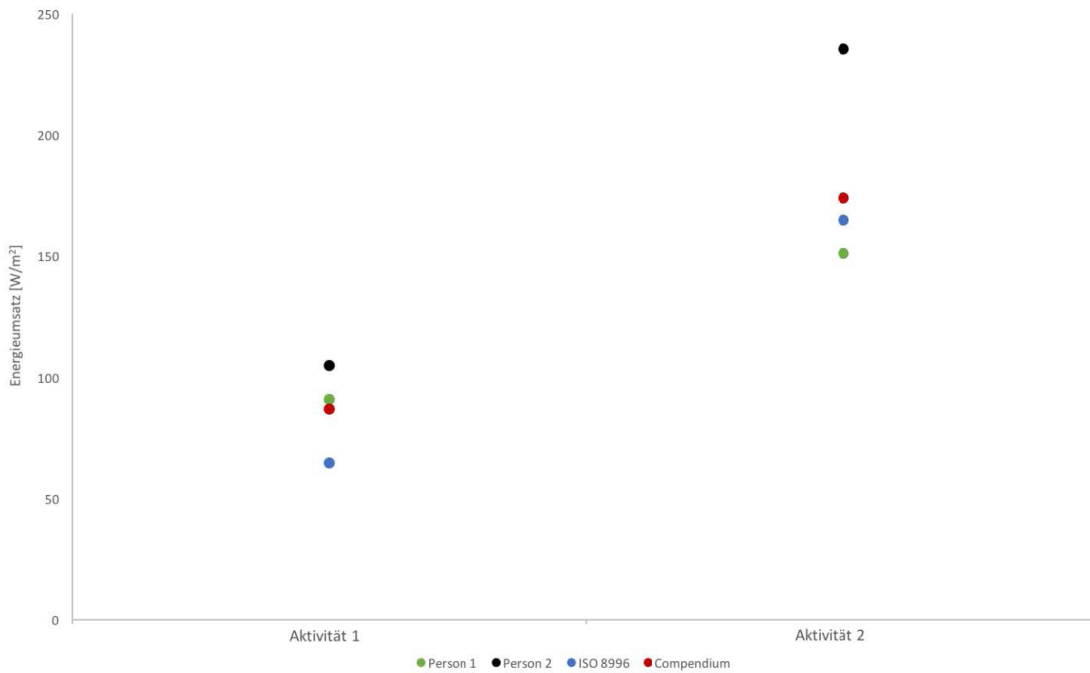
es in einem Smart Home kaum möglich ist, die genaue Aktivität einer Person im Raum mit Bewegungssensoren zu bestimmen, wird die metabolische Rate nicht auf Grundlage der ausgeführten Aktivität, sondern mithilfe der Herzfrequenz der Person bestimmt. Ein weiterer Grund für die individuelle Bestimmung der metabolischen Rate ist, dass die Standardwerte die sich auf eine Durchschnittsperson beziehen, zum Teil sehr weit von dem tatsächlichen Energieverbrauch einer Person abweichen. Zur Verdeutlichung dieses Umstandes dient die folgende Abbildung. Bei Person 1 handelt es sich um eine 26-jährige Frau mit einem Gewicht von 60 Kilogramm, während Person 2 ein 57-jähriger Mann mit einem Gewicht von 90 Kilogramm ist. Bei Aktivität 1 saßen beide Person an einem Tisch und haben sich unterhalten, bei Aktivität 2 wurden Gegenstände von einem Tisch in ein Regal verstaut.

Aufgrund der Tatsache, dass der Energieverbrauch den größten Einfluss auf eine thermisch behagliche Raumlufttemperatur hat, empfiehlt es sich auf jeden Fall den Energieverbrauch individuell zu bestimmen und nicht auf Werte aus der Norm oder beispielsweise dem Compendium of Physical Activities zurückzugreifen.

Daher muss zuerst die Herzfrequenz der Person im Raum bestimmt werden. Damit dies dynamisch erfolgen kann, empfiehlt sich die Nutzung eines Smart Wearable wie beispielsweise einer Smart Watch oder einem Fitnessstracker, die die Aufzeichnung der Herzfrequenz ermöglichen und diese gleichzeitig in eine Datenbank des Hausautomationsservers einspeisen. Bei der Durchführung dieser Arbeit in einer konkreten Testwohnung, wurde bislang keine Lösung gefunden die Herzfrequenz unmittelbar nach der Aufzeichnung mit dem Smart Wearable am Handgelenk in den Server einzuspeisen.

In Zukunft wird dies aber sicherlich mit entsprechend Applikationen möglich sein. Zu Testzwecken wurde für diese Arbeit die Herzfrequenz über ein Smartes Blutdruckmessgerät in den Automationsserver übertragen. Für diesen ließ sich eine Anbindungsmöglichkeit finden.

Abschließend wird mit einem Programm, welches ebenfalls in Matlab programmiert wurde, der Energieumsatz der betrachteten Person in Abhängigkeit der aufgezeichneten Herzfrequenz, dem Geschlecht, dem Alter sowie dem Gewicht bestimmt. Dieses



Berechnungsverfahren basiert auf einem in der ISO 8996 beschriebenen Verfahren.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die vorgestellte Methode erlaubt es, eine theoretisch thermisch behagliche Lufttemperatur in Abhängigkeit der individuellen Bekleidung und Aktivität, sowie den im Raum vorherrschenden physikalischen Randbedingungen (relative Luftfeuchte, Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit) zu berechnen. Denkbar wäre es, diese Temperaturberechnung an einen Bewegungssensor zu koppeln. Wenn ein Sensor eine Bewegung im Raum erfasst, hat sich möglicherweise etwas an der Aktivität der Person verändert und die optimale Raumlufttemperatur muss neu berechnet werden. Anschließend wird die berechnete Raumlufttemperatur mit der aktuell im Raum vorherrschenden Temperatur abgeglichen und daraufhin kann die Heizung respektiv die Kühlung gesteuert werden, um so die passende Temperatur im Raum einzustellen. Mit der gleichen Methode ließe sich auch die Lüftung in einem Raum regulieren. Anstatt mit dem PMV-Verfahren eine Lufttemperatur zu berechnen, kann ebenfalls eine theoretisch thermisch behagliche Luftgeschwindigkeit berechnet werden.

Sowohl die Bestimmung der individuell getragenen Bekleidung, als auch der metabolischen Rate bedürfen weiteren Optimierungen. Bei der Bekleidung sollte vor allem eine Methode gefunden werden, die es erlaubt die Bekleidungsisolierung mit einer ausreichenden Sicherheit zu bestimmen. Dies ist aufgrund der Tatsache, dass das System nicht unterscheiden kann welche Kleidungsstücke tatsächlich getragen werden, derzeit noch nicht gegeben. Bei der Bestimmung der metabolischen Rate, muss in Zukunft eine passende Schnittstellenlösung gefunden werden um die Daten direkt vom Smart Wearable an den Server weiterzugeben. Darüber hinaus muss in Zukunft überprüft werden, inwiefern das System verwendet werden kann, wenn sich mehr als eine Person in dem betrachteten Raum befindet.

Dennoch wurde eine Methode gefunden, die die Regulierung der Raumlufttemperatur in einem Smart Home in Abhängigkeit der individuellen Bekleidung sowie der jeweiligen Aktivität erlaubt.

Frohn, B., Ranft, F. (2004). Natürliche Klimatisierung. Energieagentur NRW, Springer Basel Ag.

Benzinger, T.H., Mayer, E. (1986). Definition der thermischen Behaglichkeit. Fraunhofer Institut für Bauphysik, IPB Mitteilung 115.

Satpathy, L. (2006). Smart housing: Technology to aid aging in place. New opportunities and challenges. Dissertation, Mississippi State University.

Aldrich, F.K. (2003). Smart Homes: past, present and future. Inside the Smart Home, Springer London, 17-39.

Mayer, E. (1989). Physik der thermischen Behaglichkeit. Fraunhofer Institut für Bauphysik, Sonderdruck aus Physik in unserer Zeit.

Vazquez, F.I., Kastner, W. (2010). Usage profiles for sustainable buildings. 15th Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Spain.

Vazquez, F.I., Kastner, W. (2012). Thermal Comfort Support Application for Smart Home Control. Ambient Intelligence: Software and Applications. 3rd International Symposium on Ambient Intelligence (ISAmI 2012), Springer Verlag.

Fanger, P.O. (1970). Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. Danish Technical Press, Copenhagen.

Prix d'excellence 2018

DESIGN CONSIDERATIONS FOR THE ENHANCEMENT OF HUMAN COLOR VISION BY BREAKING BINOCULAR REDUNDANCY_

Michel Frising

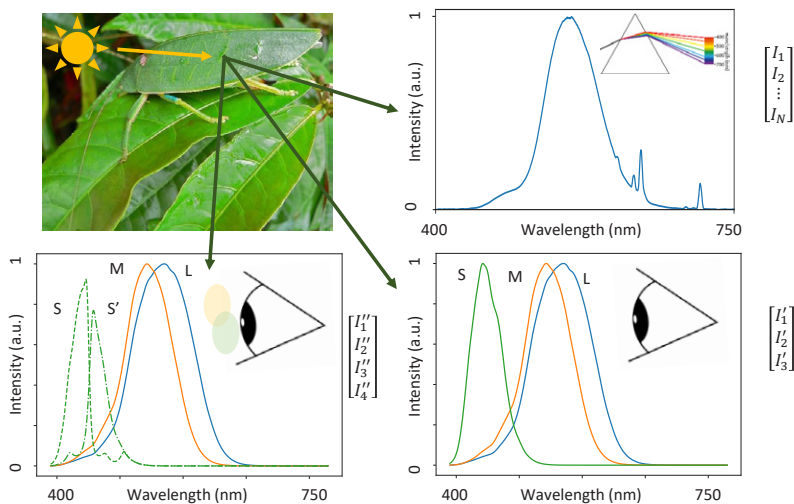


Fig. 1: What is color? Color is not inherent to the electromagnetic spectrum but depends on the visual system of the observer. Light is reflected from this Katydid in the top left image. Sending the light through a prism reveals it's spectrum as shown in the top right corner. Humans with healthy color vision have three classes of cone cells, S, M and L after the short, medium and long wavelength ranges they are sensitive to as shown in the lower right image. Light stimulates each of these cone cells and the degree of excitation is relayed to the brain. Placing different filters with tailored spectral responses can cut the response of one of these cones such that two new effective cones arise, which could potentially enhance color vision. Image credit: Bernard Dupont (CC BY-SA 2.0)

Color is so ubiquitous in our daily life that we seldomly stop to appreciate what color is and how we manage to perceive color. Are colors the same for everyone? How do colors look to animals? Herein I will try to shed light on these questions while I present the research on color vision I did while I stayed in the laboratory of Dr. Mikhail Kats at the University of Wisconsin-Madison and which was honored with the Prix d'excellence Enovos in 2019.

Color vision is the ability to distinguish colors based on the spectral composition of the light reflected or emitted from an object. Many species in the animal kingdom have evolved this capability, but for many animals, including us humans, colors vision and perception are very different in terms of what wavelength ranges are visible and how the color information is processed. For humans with typical color vision (i.e., trichromats), color perception is mediated by three photosensitive receptors of finite bandwidth, with different peak wavelengths. This has important consequences for the number of spectra and wavelengths that can be distinguished as I will explain in the following.

Interestingly, some birds and fish have evolved additional receptors to detect light in the UV. The Mantis shrimp, a colorful beast inhabiting the seas, can distinguish up to 16 different wavelength bands. In light of these facts, one wonders how the world looks like for these creatures.

Recently, a device was developed in the lab of Dr. Mikhail Kats¹ that can potentially enhance human color vision and allow us to distinguish more colors or even get a glimpse into the colorful world of the aforementioned animals. The device consists of a pair of glasses with filters of different colors or, more precisely, spectral responses, one for each eye. The filters are thin-film interference filters, alternating layers of two materials of different refractive indices. The thicknesses can be chosen in such a way that the light interferes constructively or destructively in the desired wavelength range.

The idea we were following goes back to two famous scientists, James Clerk Maxwell and Tom Cornsweet who both proposed that by presenting the same scene differently at each eye (by using different color filters for example), additional information could be gained. Maxwell initially proposed this idea to help one of his friends, who was a surgeon with a color vision deficiency. His condition made it impossible for the surgeon to distinguish fresh blood from clotted blood.

By looking at a wound through different color filters, he could actually see if the blood was fresh or not. However, Maxwell proposed to use the filters one after each other whereas Cornsweet hypothesized in his famous 1970 book "Visual perception" that by wearing filter simultaneously, additional information could be gained. However, he did not produce any evidence to sustain his claim. In honor of these two famous scientists, this idea is known as the Maxwell-Cornsweet conjecture.

To explain how different color filters in each eye can potentially augment the information content available to the brain, one needs to understand the biological basis of color vision. Color vision is mediated through the presence of three classes of cone cells in the retina. Each class of cone cells is sensitive to another band of the visual spectrum (there is also a fourth class of rod cells, which mediates vision at low light, but which cannot distinguish colors). The three classes of cone cells are referred to as S, M and L, the respective wavelength

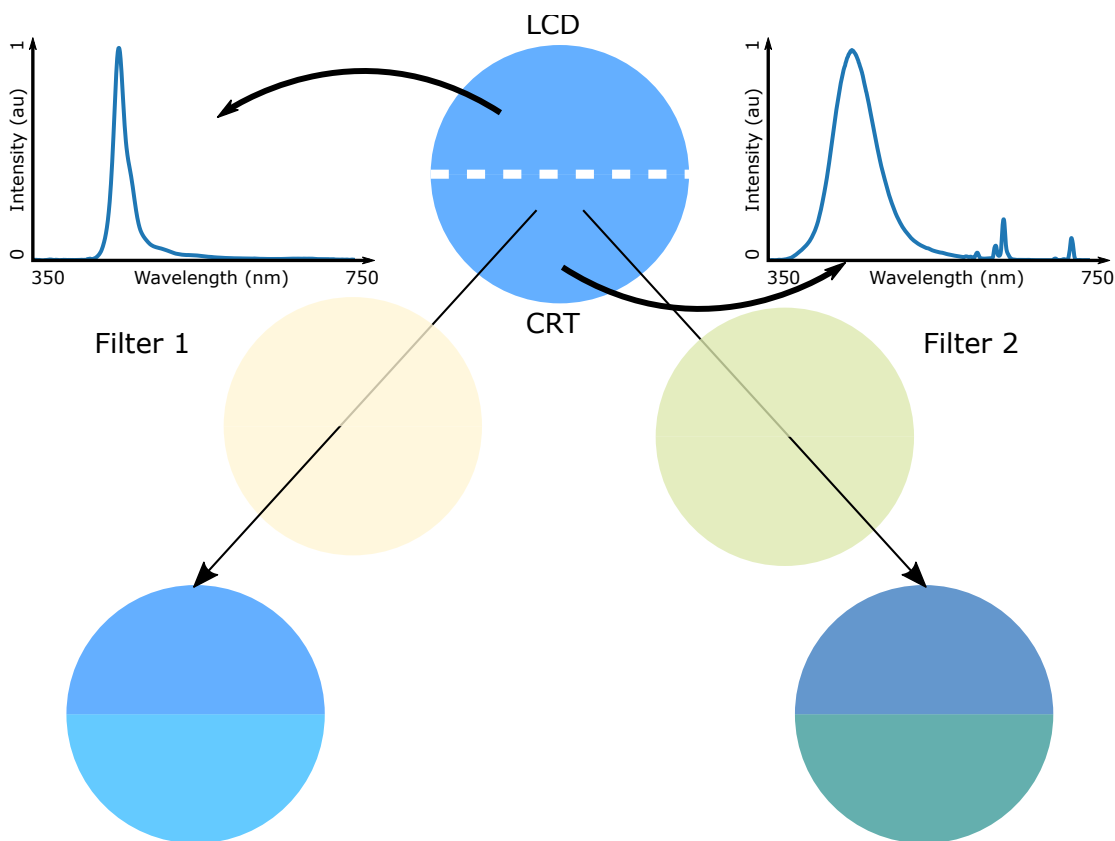


Fig. 2: Metamer generator. Plain color images from two different monitors with different primary colors are overlaid with a mirror such that the image on top with the bipartite circle. Under normal conditions, the colors can be matched perfectly and the two fields are indistinguishable. Looking at the bipartite field through the filters reveals that the light coming from each field actually has a different spectrum.

ranges they are sensitive to (short, medium and long). Light entering our eye stimulates the cone cells in each of these three classes, and the degree of stimulation of each class is then preprocessed in the retina and relayed via the optic nerve to the brain. The preprocessing in the retina consists of subtracting the response of the M from the L cone and taking the difference between the S cone and the combined signal from both L and M cones (which is known as the "opponent process"). Additionally, the responses from all channels are summed up to get the overall intensity of the signal. This information is then relayed to the brain where the appearance of color arises.

Which color perception arises depends on the spectral composition of the light entering the eye. For example, light reflected from a surface has a certain spectral composition which depends on the illumination source and the nature of the surface. The spectrum can be determined by sending the light through a prism which disperses the different wavelengths as shown in the top right panel of Figure 1. The brain will only receive the degree of stimulation from each class of cone cells, which have a broad spectral response, meaning that a lot of the spectral information is lost. The complete spectrum composed of many wavelengths is represented effectively by only three numbers, namely the

degree of stimulation of each class of receptors. There might be situations where light of different composition might result in the same stimulation vector, which will be interpreted as the same color by the brain. This effect is known as metamerism.

Another way to think about metamerism is to consider color-vision deficiencies. As in the example with the surgeon earlier, people with healthy color vision can clearly distinguish the fresh blood from the clotted, but the surgeon cannot. Color vision deficiencies in general can severely impact people's ability to perform their jobs correctly: similarly to the case of the surgeon, there are objects that, even for people with healthy color vision, appear to have the same color even though the spectra of light from these objects are different (metamerism). The reason a people with a color vision deficiency cannot distinguish certain colors is that they are effectively "missing"¹ one of the classes of cone cells (a genetic condition). Similarly, one can imagine, that by "adding" an additional effective cone, one could distinguish more colors. There is evidence in the animal kingdom of this where goldfish, for example, have an additional class of cone cells sensitive in the UV that allows them to perceive an additional dimension of color that is hidden to us. In fact, for typical humans, the color perceived from any spectrum can be matched by choosing three colors that are mixed in adequate proportions (the colors must be chosen in a way that they excite the cone cells more or less independently). Choosing only two primary colors will lead to situations where the color match cannot be achieved. For example, no mix of red and green will ever result in blue. Similarly, adapting four primary colors will lead to situations where the color match can be achieved with different combinations of different colors, introducing a redundancy. If yellow is adapted as a fourth primary additionally to red green and blue, for example, any shade of yellow can be matched by a mix of red and green, making the yellow primary redundant. With three primary colors, the color from a spectrum can be matched by only one unique combination of the three primary colors.

The filters mentioned earlier were designed to effectively split the spectral sensitivity of one of the cones in a way that there would be an additional effective cone, as shown in Figure 1. We realized that both eyes are basically identical to each other in terms of spectral sensitivity, meaning that from a biological point of view, light with

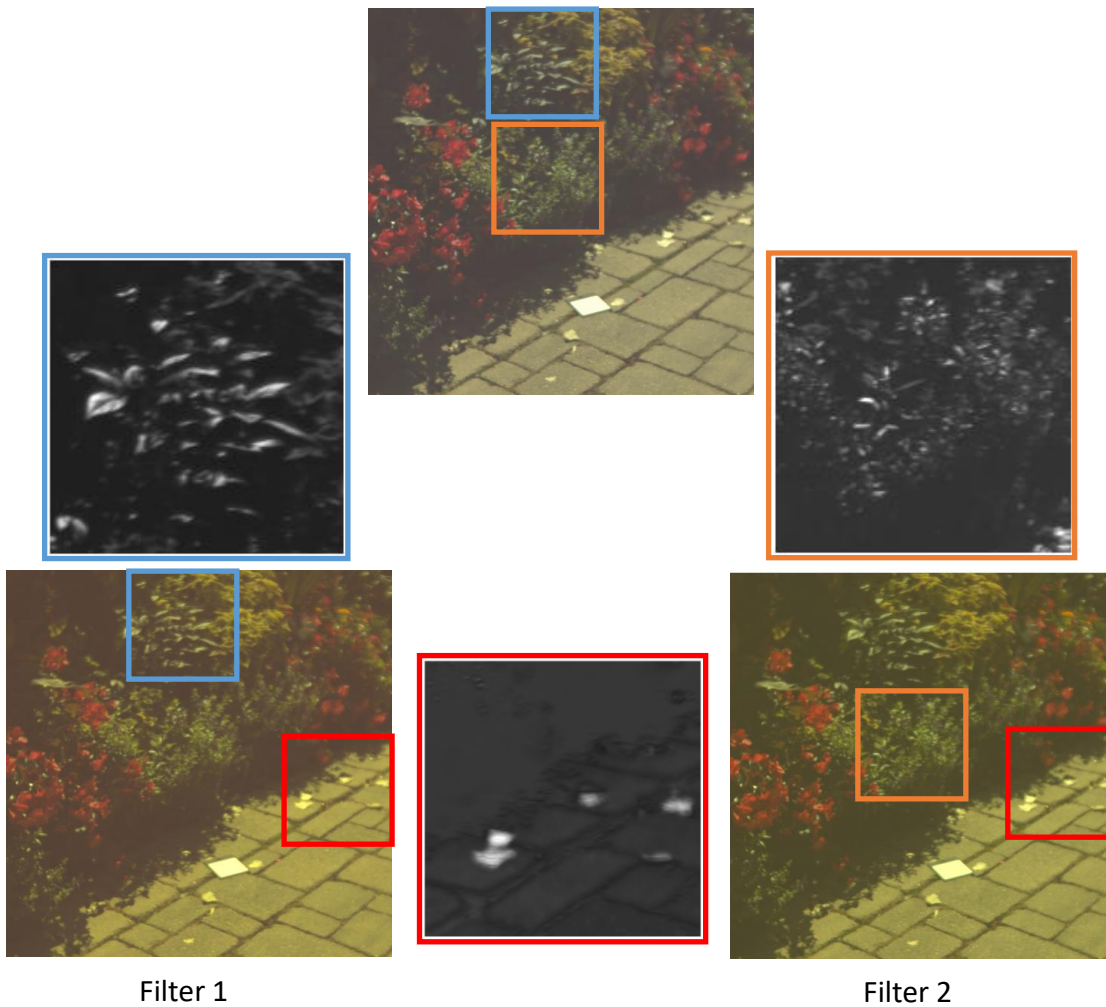
a spectrum is converted in the same color regardless through which eye it enters. We refer to this fact as binocular redundancy. One can break this redundancy by placing different color filters in each eye, such that different information becomes available to each eye. The filters designed in Dr. Kats' lab were meant to alter the input to each eye in such a way that the S cone would be stimulated differently such that it is split into two effective cones, while leaving the spectral response of the other cones mostly intact. Furthermore, care was taken that the color differences introduced in each eye were not too big because too large color differences can lead to an effect known as binocular rivalry where the brain is unable to fuse the two images and which is not the desired behavior. The idea is that two pairs of spectra that are metamers can be distinguished by at least one filter, breaking the metamerism. At the same time, two previously distinguishable colors might now have become indistinguishable, effectively keeping the number of metamers constant. The metric of performance we therefore adapted was to count metamers with and without filters. We would randomly generate pairs of spectra that might be metameric or not and we would count the number of metameric pairs without wearing the filters and the show the same pairs again while wearing filters and compare the ratio of metamers and non-metamers in both cases. To show that the filters added an additional dimensionality of color, we would need to show that a fourth primary color is necessary and sufficient to match the colors of all the spectra. This is actually a much stronger claim than decreasing the overall number of metamers.

So far it has been implicitly assumed that pairs of metamers can be readily generated. One way to generate pairs of metamers is to use two monitors that use different display technologies. Monitors have been built with color constancy in mind. If you are looking at the same picture on different monitors you want the colors to look the same or at least similar.

However, the color channels of different display technologies typically have different spectral emission spectra and yet they produce colors that are the same. Therefore different monitors are perfect candidates for metamer generators. Figure 2 shows the emission spectra of the blue color channels of two popular display technologies, namely cathode ray tubes (CRT) and liquid

¹ "Missing" in this case means that the cone cells are indeed not present or that their sensitivity curves are shifted such that they are identical.

Unfiltered



_Fig. 3: A hyperspectral image taken of flowers along the sidewalk. Each pixel of the image contains a complete spectrum and filters can be applied digitally before rendering what we would see without filters (top) and with filters (bottom). The rectangles highlight regions of large differences in color between pictures. Image courtesy of Jad Salman.

crystal displays (LCD). The color channels on the two monitors can be adjusted such that the displayed colors match. The final setup to quantify enhancement of color perception is shown in the rest of Figure 2. The same color is shown on each display and vertically stacked with the help of a mirror.

When looking at the two halves through the filters, they can be distinguished, breaking the pair of metamers. When colors are randomly sampled from both displays, a certain fraction will be metameric pairs, the rest not. From these numbers we calculate the ratio (#Metamers)/(# Non metamers). The same colors are then shown while looking through the filters and the same ratio is calculated. If the filters work as intended, this ratio is smaller when wearing the filters.

To move to more realistic scenes, we made use of hyperspectral images. These are images that have the complete spectral information available for each pixel, instead of only the three RGB values. With the spectral information available, different filter designs can be tried quickly, without the need to physically produce the filters every time. Figure 3 shows a scene we rendered from a hyperspectral image as perceived without the filters and with the filters. The blue and orange insets in Figure 3 show the expected color differences between filtered and unfiltered images, where white indicates big differences and black small differences between the two images. These differences represent also the expected differential information available to the brain. We used a virtual reality setup (Oculus Rift), which is capable of providing different images to each eye, to direct the image as seen through filter 1 and 2 to the right and left eye.

In summary, the proposed filters have the potential to enhance color vision, and rigorous experiments using the methods described above and adhering to the standards of vision psychology are currently under way in the lab of Dr. Kats to corroborate this claim. Opening up a new dimension of color vision has wide-ranging applications, starting from helping people with color vision deficiencies, to detecting camouflage and counterfeits to new forms of entertainment. A particularly interesting application is the idea of fusing information in the spectral ranges that are invisible to the human eye via up- or/and downconversion with the existing color vision. This idea is also currently being explored by Dr. Kats and his team.

References

- Gundlach, B. S. et al. Design considerations for the enhancement of human color vision by breaking binocular redundancy. *Scientific Reports* 8, (2018).

Die Baubranche ist einer der größten Energiekonsumenten Europas und verursacht ca. 50 Prozent des gesamten Rohstoffabbaus [1]. Um die drei Hauptziele der Klima- und Energiepolitik der EU [2] bis 2030 zu erreichen, muss eine ressourceneffiziente Kreislaufführung erfolgen. Da jedoch viele der verbauten Stoffe beim Abbruch entweder minderwertig recycelt, thermisch verwertet oder deponiert werden, rücken die Materialwahl und der Materialfluss eines Gebäudes in den Vordergrund.

Prix d'excellence 2018

GEBÄUDE IM MATERIALFLUSS - NACHWACHSENDE ROHSTOFFE IN EINEM REALISIERTEN GEBÄUDE IN LUXEMBURG – EINE ZUKUNFTSPERSPEKTIVE?_

Annouk Godelet



_Abb. 1: „Miscanthus x giganteus“

In diesem Artikel, basierend auf meiner Masterarbeit [3], wird beschrieben inwieweit sich die Circular Economy in Luxemburg und seiner Baubranche bis 2017 etabliert hat und warum der Beton aus „Miscanthus x giganteus“ ein zirkulärer Baustoff ist.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es den Denkansatz der Circular Economy mit der heutigen Architektur zu verknüpfen um ein Konzept eines „Gebäudes im Materialfluss“ zu entwickeln. Auf der Grundlage einer Literaturanalyse, Gesprächen mit Experten der Circular Economy in Luxemburg und durch die Synthese ausgewählter Bewertungssysteme wurde ein Index für die Planung zirkulärer Gebäude entwickelt und anschließend geprüft. Mithilfe dieses Tools wurde ein bestehendes Bauprojekt in Luxemburg analysiert, im Hinblick auf seine Zirkularität geprüft und mit einem konventionellen Gebäude verglichen. In diesem Beitrag wird nicht weiter auf die Entwicklung und die Anwendung des Tools eingegangen.

Einleitung

In Europa zählt der Bausektor zu den umsatzstärksten Wirtschaftsbereichen und ist zugleich mit 33% der größte Abfallverursacher [4]. Der heutige lineare Bauprozess, bei dem das Gebäude als „Endprodukt“ zu verstehen ist [5] und unzählige verbaute Stoffe beim Abriss entsorgt werden müssen sowie wertvolle Rohstoffe verloren gehen, stellt die Baubranche zunehmend unter großem Druck.

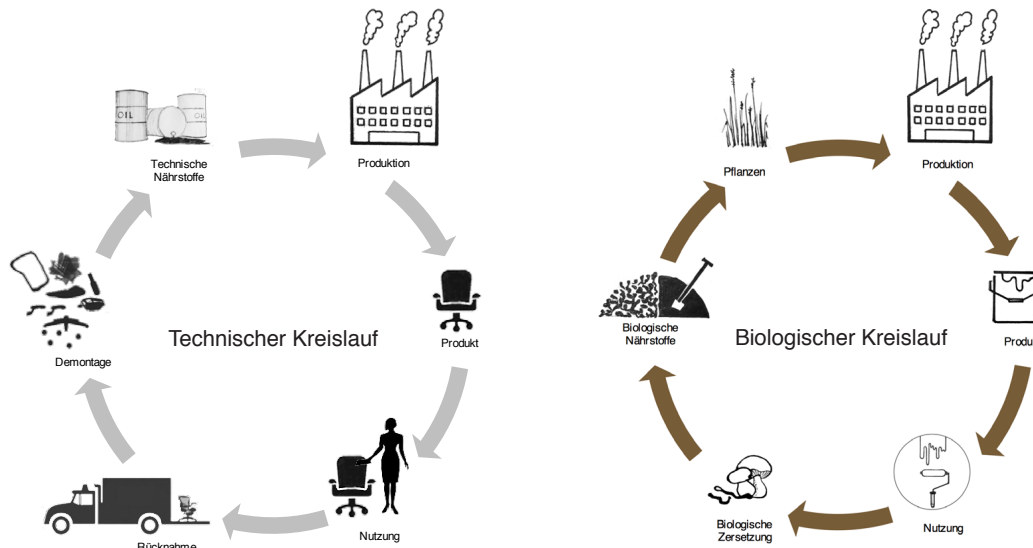
Sofern keine Gegenmaßnahmen getroffen werden, könnten einerseits Rohstoffe knapp und teurer werden, andererseits die Abfallströme zukünftig rasant steigen.

Im direkten Kontrast zum linearen System steht eine neue Wirtschaftsweise: die Circular Economy (deutsch: zirkuläre Wirtschaft). Das Wertschöpfungskonzept geht von geschlossenen Stoffkreisläufen aus: Reuse – Repair – Refurbish [6], „wiederverwenden - reparieren - neu aufbereiten“ und soll zukünftig ökonomische Werte schaffen, den Rohstoffabbau minimieren und neue kreative Prozesse lancieren.

Für den Menschen und seine Gesundheit spielt die richtige Baustoffwahl eine entscheidende Rolle, denn er hält sich fast ausschließlich in einer gebauten Umwelt auf. Statistiken sprechen von einem Durchschnitt von 90% Aufenthaltszeit in Gebäuden [7]. Umso wichtiger ist es, ein behagliches und gesundes Raumklima z.B. durch die Verwendung emissionsarmer und gesundheitlich unbedenklicher Baustoffe zu schaffen. Auch Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen wie Holz, Stroh oder das Chinaschilf „Miscanthus x giganteus“ (Abbildung 1) gewinnen zunehmend an Bedeutung. Gerade bei der Lebenszyklusbetrachtung schneiden sie deutlich besser ab als konventionelle Baustoffe wie PUR-Dämmung, Bitumenabdichtungen oder PVC-Beläge.

Neben den ökologischen Aspekten sind bei der Materialwahl auch die wirtschaftlichen Faktoren zu berücksichtigen. Denn je nach Gebäudenutzung kann der Materialverbrauch einen Anteil von 25-30% der Baukosten ausmachen [8]. Die Baustoffe nach ihrem „Lebensende“ (oder „End-of-Life“) nicht wieder zu verwenden, ist eine Ressourcen- und Geldverschwendung. Daher sollten Gebäude zukünftig als Rohstofflager fungieren. Wenn dieses Konzept konsequent durchgeführt wird, kann es auch zu einer effektiven Senkung der Baukosten führen: Baumaterialien werden nicht mehr gekauft, sondern beim Hersteller geleast oder bei der Bank als Sicherheit hinterlegt [9].

Mit der Einführung der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments [10] sind seit 2008 europaweit Recycling-Industrien entstanden, mit dem Ziel, langfristig das Abfallaufkommen zu senken. Seitdem ist ein Anstieg an rückgewonnenen Baustoffen zu vermerken. Dennoch fehlt es derzeit an Konzepten, die eine geschlossene Kreislaufführung ermöglichen.



_Abb. 2: Technischer und biologischer Kreislauf nach Cradle to Cradle®

Circular Economy

Bereits 1911 versuchte der schottische Naturforscher John Muir mit seiner These in „My First Summer in the Sierra“ die Natur zu beschreiben. Die unberührte Landschaft ist miteinander verbunden und regenerativ; jeder Grundstoff fungiert hier als Basis für etwas Anderes. Diese Ansicht charakterisiert idealerweise ein neues Wirtschaftsmodell, das der Circular Economy, kurz CE. Das heutige Modell der CE wurde jedoch erst 2012 durch die Beiträge der Ellen MacArthur Foundation geprägt.

Die Circular Economy (deutsch: zirkuläre Wirtschaft) beabsichtigt eine Wirtschaftsweise, in der Ressourcen und Produkte in kontinuierlichen Kreisläufen verwendet werden und zukünftig als Rohstoffquelle dienen. Industrielle Systeme sollen so gestaltet werden, dass kein Abfall mehr entsteht bzw. Abfall zur Ressource wird. Das kontinuierliche Zirkulieren der Stoffe verbessert die Produktqualität, minimiert den Rohstoffabbau und erzielt damit positive Effekte in der Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft. [11]

Ein Wirtschaften in Kreisläufen ermöglicht demnach nicht nur eine bessere Wertschöpfungskette und Kosteneinsparungen, sondern dient auch als Anstoß für Innovation. Zudem fördert die Circular Economy neue Businessmodelle, wie beispielsweise die „Sharing Economy“.

Eine Basis neuer Qualitäten im Bauwesen bildet heute unter anderem das vom deutschen Chemiker M. Braungart und US-amerikanischen Architekten W. McDonough entwickelte Designkonzept Cradle to Cradle® (deutsch: von der Wiege zur Wiege), kurz C2C. Abbildung 2 zeigt zwei Kreisläufe (der biologische und der technische Kreislauf) in denen die Produkte zirkulieren und dessen Inhaltsstoffe schadstofffrei, chemisch unbedenklich und sortenrein trennbar sind. [12]

Das Modell der Circular Economy in Luxemburg und seiner Bauindustrie

Neben der Finanzwirtschaft gehört die Baubranche zum zweitwichtigsten Wirtschaftszweig Luxemburgs. Das Abfallaufkommen beträgt hier 84%, was im Vergleich zur gesamten EU-28 mit 33% überdurchschnittlich hoch ist [13]. Um so wichtiger ist es, dass die Bestandteile eines Gebäudes (Materialien, Baustoffe oder Bauteile), die für eine gewisse Dauer in definierten Beziehungen zueinanderstehen, sich in einem kontinuierlichen „Materialfluss“ befinden, wodurch die Kreislaufschließung im Bauprozess zu einem primären Ziel wird.

Die Niederlande gelten auf dem Gebiet der Circular Economy seit einigen Jahren zu den Vorreitern Europas. Seit 2015 stehen diese Prioritäten auch auf dem

Programm der Luxemburger Regierung. Am 9. Februar 2015 präsentierte die Luxemburger Staatssekretärin für Wirtschaft, Francine Closener, die Ergebnisse einer von EPEA durchgeführten Machbarkeitsstudie „Luxembourg as a Knowledge Capital and Testing Ground for the Circular Economy“. Das Fazit dieser Studie war, dass das Potenzial der CE für Luxemburg sehr hoch ist. Damit setzt sich die Luxemburgische Regierung offiziell die Umsetzung der zirkulären Wirtschaft zum Ziel.

Um die zirkuläre Wirtschaft in Luxemburg voranzutreiben gründete das Wirtschaftsministerium eine Strategieguppe. Zudem gibt es das Programm „fit4circularity“ des Ecolnnovation-Clusters, welches Unternehmen bei der Umsetzung von zirkulären Praktiken unterstützt. Privatwirtschaftliche Initiativen bieten neben der CE-Beratung auch Weiterbildungen an (z.B. +Impakt). „In Zukunft wird wohl mehr in der Circular Economy zu tun sein. Erste Ansätze gibt es bereits in Luxemburg, große Projekte jedoch noch nicht.“, so die Aussage aus dem Experteninterview mit Jeannot Schroeder, Direktor bei +Impakt. Das Umdenken in den Unternehmen hat begonnen, die konkrete Umsetzung von zirkulären Praktiken benötigt jedoch Zeit und vor allem das Engagement vieler Akteure, um diesen Übergangsprozess zu unterstützen.

Auf nationaler Ebene kann das CE Modell jedoch nur funktionieren, wenn auch die regionale Land- und Marktwirtschaft gefördert wird. Neben Sensibilisierungskampagnen sollten auch Bildungsprogramme an Schulen und Universitäten – wie dies die Ellen MacArthur Foundation bereits erfolgreich anbietet – eingeführt werden. Eine gesetzliche Verankerung, der Aufbau eines internationalen Netzwerkes und die Förderung von Zusammenarbeit, sind Faktoren, die in Zukunft durch die Regierung stärker angegangen werden müssen. Nur so gelingt der Umschwung von einer Wegwerf-Gesellschaft zu einer Rückbring-Gesellschaft. Die Interviewpartner sehen in den Herausforderungen der Circular Economy grundsätzlich eine Chance für die Luxemburger Baubranche; sind sich jedoch unsicher, wie schnell die Umsetzung von konkreten zirkulären Praktiken erfolgen wird. „Die Circular Economy wird sich nur in der Baubranche etablieren können, wenn neue gesunde Baustoffe und eine zirkuläre Bauweise von der Regierung gefördert und subventioniert werden. Denn ohne eine finanzielle Unterstützung wird es schwierig, einen kreislauffähigen Markt aufzubauen. (...)“, so Carlo Posing, Geschäftsführer von Miscanthus.lu.

Das Land steht erst ganz am Anfang des Übergangsprozesses von einer linearen zu einer zirkulären Wirtschaft. In der Baubranche können sich zirkuläre Praktiken zum Beispiel durch Pilotprojekte und Sensibilisierungskampagnen auf dem Markt etablieren. Ausschlaggebend für den Erfolg der Circular Economy ist auch der wirtschaftliche Faktor: Wenn innovative Gebäude preislich nicht mit konventionellen Gebäuden konkurrieren können, ist ihre Umsetzbarkeit problematisch.



Abb. 3: Miscanthus x giganteus am Standort „Campus Klein-Altendorf“ der Universität Bonn (Rheinbach, Deutschland)

Eine Vielzahl von Bauprojekten - unter Berücksichtigung der Kriterien der Circular Economy - ist bereits (2017) in Planung und wird durch unterschiedliche Ministerien gefördert. Dies sind u.a. Bauprojekte in Wiltz, ein demontierbares Parkhaus in Esch-sur-Alzette, der Automotive Campus in Bissen oder der Pavillon für die Weltausstellung in Dubai 2020.

„Miscanthus x giganteus“ in Luxemburg

Durch die immer wieder in den Vordergrund tretende Verknappung fossiler Rohstoffe gewinnen nachwachsende Rohstoffe, kurz NawaRo, zunehmend an Bedeutung. Eine erfolgreiche Anwendung biobasierter Materialien wird durch Verfügbarkeit, Qualität, Preisfrage und Verarbeitungstechnologie geprägt, vor allem aber durch die Entwicklung des Rohölpreises und die damit verbundene Marktetablierung [14]. Gerade beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe gibt es derzeit in Luxemburg große Bestrebungen. Ein Rohstoff verspricht hier besonders großes Potential als Baustoff eingesetzt zu werden: das Chinaschilf „Miscanthus x giganteus“.

Das Großgras gehört zur Familie der Süßgräser (Poaceae) und ist eine Dauerkultur. Der Rohstoff wird seit den 1980er Jahren in Mitteleuropa kultiviert und findet u.a. als Holzersatz für die Zellstoffindustrie Verwendung. Miscanthus kann insbesondere an ungünstigen Flächen wie z.B. dreieckige Felder oder Hanglage angebaut werden. Die Pflanzung findet im Frühjahr (März bis Mai) auf unkrautfreiem Boden statt. Das sogenannte Elefantengras kann bis zu fünf Zentimeter am Tag wachsen und innerhalb eines Jahres vier Meter hoch werden (Abbildung 3). Auf Düngung kann verzichtet werden, da die Pflanze nach einem Jahr abreifen soll. [15],[16]

Für viele Luxemburger Landwirte könnte der Anbau von Miscanthus durch die obengenannten Vorteile eine ideale Lösung darstellen. Zwar ist das Großgras noch recht unbekannt, einige Landwirte wie Carlo Posing haben das Potential jedoch bereits vor zehn Jahren erkannt. Hier ist wiederum die Politik gefragt, damit einerseits der nachwachsende Rohstoff in der Bauindustrie stärker gefördert wird und andererseits die Landwirte sensibilisiert werden.

Weitere Informationen zu dem Thema können aus meinem Beitrag „Wie viel Nachhaltigkeit braucht Luxemburg“ in der Revue Technique Luxembourgeoise Nr. 2/2018 entnommen werden.

Herstellungsverfahren von Miscanthus-Leichtbetonwänden

Miscanthus x giganteus“ bietet eine optimale Alternative zu herkömmlichen Dämmstoffen im Bauwesen. Dies wird aus der pflanzlichen Zusammensetzung deutlich. Miscanthus setzt sich aus folgenden Substanzen zusammen [16],[17]:

- _43,9% Hemicellulose (Teil der Stützsubstanz von Zellwänden)
- _41,2% Cellulose (Hauptbestandteil der Zellwand und Rohstoff für Papierherstellung)
- _12,9% Lignin (Stützmittel und verhärtetes Polymer, Festigkeit der Pflanze)
- _2,0% Mineralien und Extrastoffen

Der Stängel besteht außen aus Silizium, dies sorgt für Festigkeit. Die äußeren Leitungen sorgen für die Aufnahme des Bindemittels, z.B. Wasser-Zement. Im Inneren dienen die Fasern auch der Wasseraufnahme. Ein sehr entscheidender Prozess um die Festigkeit eines Produkts zu garantieren. [18]

Im Vergleich dazu Holz:

- _45% Cellulose
- _23% Hemicellulose
- _22% Lignin
- _10% Mineralien, Harze, ätherische Öle, Stärke

Unter Laborbedingungen werden die gehäckselten Miscanthus-Stängel mit Styropor verglichen. Die mikroskopischen Darstellungen (Maßstab 1:500) in den Abbildungen 3 und 4 zeigen, dass die Struktur beider Objekte gleich ist [18] und Miscanthus damit Eigenschaften eines ausgezeichneten Dämmstoffes vorweist.

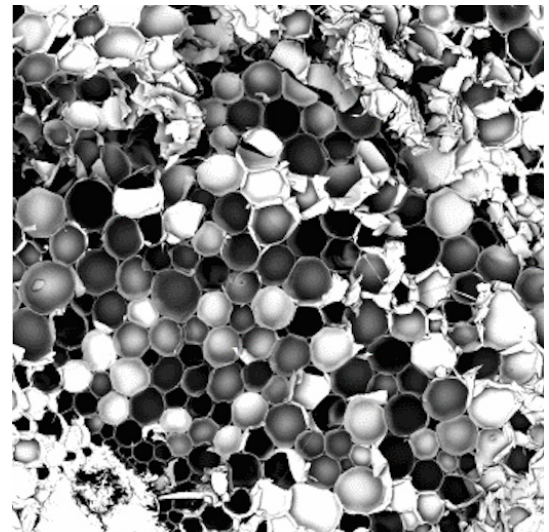


Abb. 4: Miscanthus unter mikroskopischer Betrachtung (1cm = 20 µm)

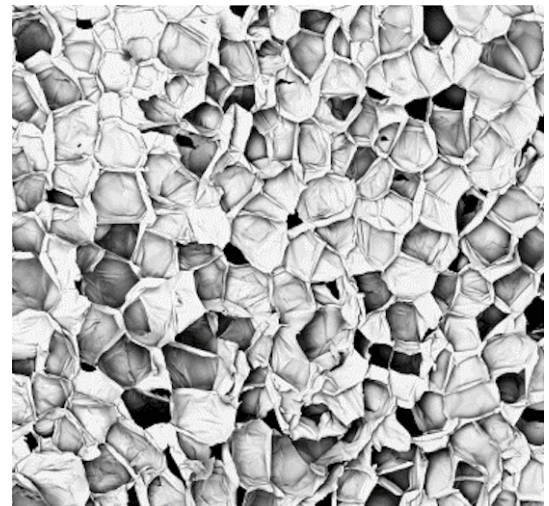


Abb. 5: Styropor unter mikroskopischer Betrachtung (1cm = 20 µm)

Der Herstellungsprozess und der daraus resultierende Baustoff auf Basis von Miscanthus wurde 2004 als Patent (PCT No CH2002/000583) angemeldet [17].



_Abb. 6,7: Schalung für die Miscanthus-Wandelemente



_Abb. 8: Konstruktionsdetail, Stand 31.03.2017



_Abb. 9: Fertigstellung Tennis Club Lorentzweiler

Neben der Schweiz, als Vorreiter, wurde in Österreich und mittlerweile auch in Luxemburg Miscanthus als Baustoff in Gebäuden eingesetzt. 2002 wurde das erste Miscanthus-Gebäude unter Verwendung von Miscanthus-Wänden in einem Wohnhaus in der Schweiz gebaut [17].

Die Inhaltsstoffe des Miscanthus-Beton (in Gewicht %) setzen sich aus folgendem Gemisch zusammen [39]: 26% Miscanthushäcksel (12-20mm Fasern), 17% Zement, 17% Kalk, 35% Wasser, 5% Stärke (Salz).



_Abb. 10: Fertigstellung Tennis Club Lorentzweiler

Mit dem Pilotprojekt "Tennis Club Lorentzweiler", dessen Materialfluss in meiner Masterarbeit analysiert wurde, wurden in Luxemburg erste gute Ansätze mit Miscanthus-Wandelementen (Abbildungen 6-10) umgesetzt. Das Herstellungsverfahren entspricht einer klassischen Betonfertigteil-Produktion und muss daher nicht angepasst werden. Für den Mischprozess des Betons wurde ein standardmäßiger Betonmischer eingesetzt. Nach ca. 24 bis 48 Stunden sind die Miscanthus-Wandelemente gebunden und trocken.

Der Einsatz von Miscanthus als Baustoff verspricht neben sehr guten bauphysikalischen Ergebnissen vor allem keine Schadstoffbelastungen für die Nutzer [17]. Weitere Eigenschaften sind Schädlings- und Pilzresistenz, Kreislauffähigkeit und damit verbunden die biologische Abbaubarkeit. Somit sind die Miscanthus-Leichtbetonwände aus baubiologischer und ökologischer unbedenklich. Das Unternehmen Miscanthus.lu vermarktet das Produkt.

Zusammenfassung

Das primäre Ziel dieser Arbeit war es, eine allgemeine Grundlage über die Circular Economy und ihre Umsetzbarkeit in der Bauindustrie zu erarbeiten und anschließend einen Leitfaden für Gebäude im Materialfluss zu entwickeln und anhand eines Beispielgebäudes zu prüfen. Mit einem neuen Denkansatz, einem Denken in Kreisläufen, könnte eine Lösung gefunden sein. Insbesondere für ein rohstoffarmes Land wie Luxemburg, das von Importen abhängig ist, wäre dies ein interessantes Modell.

Die Verwendung nachwachsender Rohstoffe in der Luxemburger Bauindustrie erweist sich heute (zum Zeitpunkt der Erfassung meiner Masterarbeit) noch als sehr gering. Dennoch verspricht sie eine Zukunftsperspektive. Beeindruckend ist neben den herausragenden Eigenschaften auch das Ergebnis, dass das Großgras ähnliche Dämmwerte erreicht wie ein konventioneller fossiler Dämmstoff und daher als Dämmstoff durchaus konkurrenzfähig ist. Miscanthus findet seit 2017 in dem Luxemburger Bausektor Verwendung. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher das erste realisierte Gebäude mit Miscanthus-Wandelementen näher illustriert.

Das Großgras „Miscanthus x giganteus“ ist ein gutes Beispiel dafür wie sich ein noch unbekannter Rohstoff auf dem Markt etablieren kann, wenn er beispielsweise durch das Nachhaltigkeitsministerium unterstützt und gefördert wird. Sowohl die Auseinandersetzung mit der einschlägigen Literatur als auch die Ergebnisse der Experten-Interviews führten letztlich zur Erkenntnis, dass eine Umsetzung des Modells der Circular Economy in der Luxemburger Bauindustrie möglich ist, jedoch noch am Anfang steht. Inwieweit Gebäude im Materialfluss umsetzbar und finanziell tragbar sind sollte weiter erforscht werden.

Overcoming obstacles in a manual wheelchair requires strong and skilful pilots. Many wheelchair users with residual arm function are hence limited in their mobility, or rely on heavy electric wheelchairs. To demonstrate that low weight, high manoeuvrability and powered assistance can be combined by means of elaborate control algorithms, a prototype of a force-augmenting self-stabilising wheelchair was developed. A balancing assistance was shown to successfully bring users into a wheelie and to stabilise them.

Prix d'excellence 2018

DEVELOPMENT OF A FORCE-AUGMENTING SELF-STABILISING WHEELCHAIR

Marc Meyers & Bob Hoffmann



Fig. 1: Developed wheelchair prototype with a paraplegic user testing the elaborated balancing assistance.

According to the World Health Organization, there are over 65 million wheelchair users worldwide. In the USA, 30% of the 2.2 million wheelchair users rely on electric wheelchairs to overcome daily-life obstacles, because of either their age or restricted motor functions. Manual wheelchair users enjoy increased mobility and independence, but also struggle in daily life, with 25% to 80% suffering from upper joint injuries in the long term. Alternative wheelchairs that facilitate the management of daily-life obstacles (DLOs) already exist. These either use electric motors or a propulsion system that does not rely on pushrims (e.g. manual wheelchairs with lever propulsion). Not using the

traditional pushrims offers the possibility to improve the mechanical efficiency and the usability by wheelchair users with higher impairment levels. However, this increases the mechanical complexity of the wheelchair and does not offer any support for difficult manoeuvres. In contrast, electric wheelchairs can provide assisting power and thereby support overcoming obstacles. Thus, even people with severely restricted motor functions can remain mobile. However, electric wheelchairs are often challenging to steer in confined spaces and, due to the additional electric power train, their weight can surpass 100kg. This poses problems in many daily-life situations, e.g. when the wheelchair must be transported by car. The bulkiness of these wheelchairs is also often associated with a negative social appearance. Pushrim-Activated Power Assistive Wheelchairs, short PAPAAs, amplify the user's power applied on the pushrims. Multiple studies have shown that these wheelchairs reduce metabolic cost and provide good assistance for activities of daily living requiring a high amount of force. However, the same studies also show that for tasks requiring greater wheelchair control skills, especially wheelie skills, PAPAAs do not provide any benefit and can even render these tasks more difficult than with a manual wheelchair. Only a very limited number of research projects have focused on providing assistance through more elaborate control approaches such as rear wheel balancing for obstacle overcoming. The goal of the present work is to demonstrate advanced assistance combined with only minimal alterations to a conventional wheelchair. By adapting admittance control strategies to wheelchairs for force amplification and elaborating an automatic wheelie balancing assistive feature for skill augmentation, the developed prototype should enable a user with restricted upper body capabilities to overcome the most common DLOs while maintaining the benefits of a manual wheelchair.

Control Strategy

Advanced model-based control algorithms require an analytical model of the wheelchair with a human user. The Equations of Motion (EoM) were derived using the Newton-Euler-D'Alembert principle relying on the variables shown in Fig. 2:

$$M(q) \cdot \ddot{q} + b(q, \dot{q}) + g(q, \dot{q}) = J_h^T \cdot \tau_h + J_u^T \cdot \tau_u$$

with Jacobians J_h and J_u , the mass matrix of the system $M(q)$, $b(q, \dot{q})$ a vector containing the terms relating to gyroscopic accelerations and $g(q, \dot{q})$ the vector of the

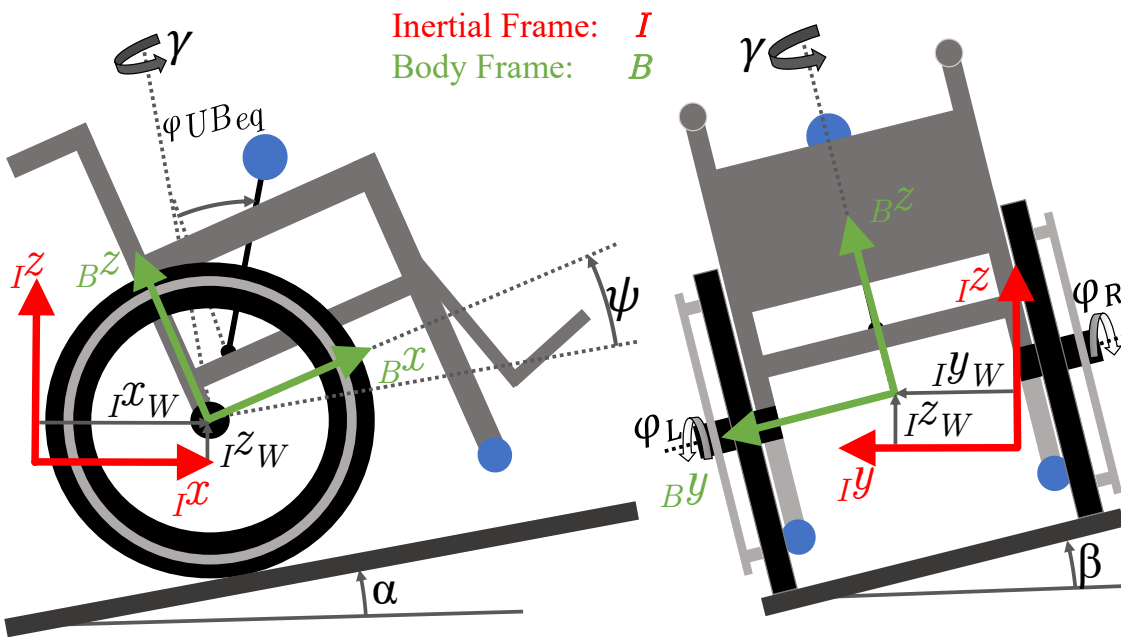


Fig. 2: Wheelchair model variables and reference frames.

generalised internal frictions as well as of the gravitational forces. The right-hand side contains the torques applied by the human user τ_h and the motors τ_u , i.e. the input to the system. By defining the control input u as the motor torque

$$u = [\tau_{u_l} \quad \tau_{u_r}]^T$$

the nonlinear state dynamics can be expressed by

$$\begin{bmatrix} \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{q} \\ M(q)^{-1} \cdot (-b(q, \dot{q}) - g(q, \dot{q}) + J_h^T \cdot \tau_h + J_u^T \cdot \tau_u) \end{bmatrix}$$

The main conditions for the wheelchair are the Not-In-Wheelie (all wheels have ground contact) as well as the Wheelie state (balancing on its rear wheels), and the transitions in between (Fig. 3).

The different states of the wheelchair require different controllers with distinct control goals. Therefore, a switching controller is implemented. Its output does not only depend on the continuous states, e.g. pitch angle or wheel velocity, but also on the discrete state of the state machine. In the following, we will focus on the control

strategy for the Wheelie state and leave it to the interested reader to derive the force augmenting admittance control strategy of the Not-In-Wheelie state.

The main goal of the wheelie control (Fig. 4) is to stabilise the wheelchair at its rear-wheel-balancing equilibrium as well as to track the wheels' reference positions and velocities. Although balancing a system on two wheels is the topic of many robotic studies, only few try to apply these strategies to power assisting wheelchairs. However, as a balancing wheelchair is comparable to an inverted pendulum, these strategies, e.g. LQR stabilisation, should also be successful for this system. The main difference between a robotic system and a wheelchair with a user inside is that for a robotic system, a very accurate white model can be derived.

For the wheelchair with user, the model and the control have to deal with greater uncertainties due to the positioning and motion of the user and have thus to be extremely robust to disturbances. As an LQR controller offers the possibility to weigh the importance of maintaining the equilibrium pitch higher than the reference tracking of the wheel positions,

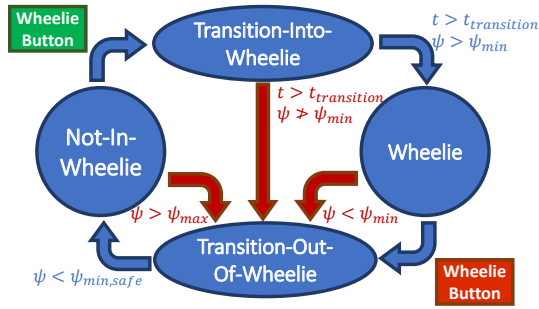


Fig. 3: The four main conditions of the employed state machine with the transition conditions.

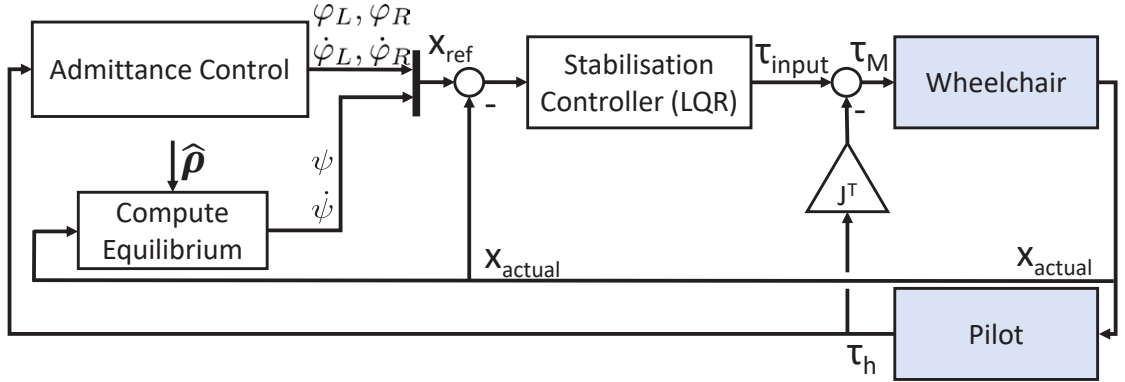


Fig. 4: The wheelie control strategy.

it is expected that a properly weighted LQR is capable of handling parameter uncertainties.

State Estimation

The different control strategies rely on the knowledge of the current wheelchair states (i.e. α , β , φ_{UBeq} , γ , ψ and q). However, a sensor-based decoupling of the slope angles α , β and the wheelchair pitch angle ψ could not be devised. Instead, an estimator in the form of an Extended Kalman Filter (EKF) is implemented. The Kalman filter offers the advantage of enabling a model-based sensor fusion, when multiple measurements correlate to a state. It provides more reliable state estimates than using a single measurement per state and is still computationally efficient enough to run on a microcontroller. The considered Kalman state and input are

$$x = [\alpha \ \beta \ \varphi_{UBeq} \ \gamma \ \psi \ \dot{q}^T]^T$$

$$u = [\tau_L \ \tau_R \ \tau_{hL} \ \tau_{hR} \ \varphi_L \ \varphi_R]^T$$

and the continuous time dynamics of the state, are given by

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha}(t) \\ \dot{\beta}(t) \\ \dot{\varphi}_{UBeq}(t) \\ \dot{\gamma}(t) \\ \dot{\psi}(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{b}{2} r_{RW} (\varphi_R - \varphi_L) \\ [1 \ 0 \ 0] \cdot \dot{q} \\ M^{-1} \cdot (-b - g + J_h^T \cdot \tau_h + J_u^T \cdot \tau_u) \end{bmatrix} + v$$

with v the process noise with Gaussian probability distribution. The parameter vector α , β , φ_{UBeq} have no explicit dynamics, but are only driven by noise. γ is updated based on the rolling constraints, and the generalised coordinates evolve using the previously defined EoM. The explicit dependence on q and \dot{q} was dropped for readability. These equations are linearised around the current state estimate and then discretised in each time step on the microcontroller for the use in the Kalman filter.

Early tests performing the wheelie showed that the derived EKF does not provide sufficiently robust estimates of the pitch ψ . When the Kalman filter is fed a change in the wheelchair's orientation measurement, it distinguishes between a variation of the inclination α and β or a change of the pitch ψ . The induced time lag for a clear distinction causes the Wheelie controller to no longer stabilise the wheelchair at the wheelie equilibrium. Therefore, it was decided to implement a Switching EKF. This form of observer estimates different states and parameters depending on the wheelchair's condition. As a state machine was already

developed for the control, the estimator is based on the same one. It allows to keep the estimation of α and β constant in the Wheelie mode and consequently only estimates the pitch angle. This is done by adding α and β to the Kalman Input u . It proved to be sufficient to stabilise the balancing of the wheelchair.

Functional Prototype

To test the developed control strategies on a wheelchair with a pilot, a functional PAPA prototype was developed. The prototype is based on a manual wheelchair (Sopor Argon, Sunrise Medical, United Kingdom, 2005). Fig. 5 shows the main modifications of the wheelchair, namely the sensors placed under the seat and on the actuated wheels. The actuation of the wheels, is performed by two e-bike hub motors (maxon motor AG, Switzerland), which can produce 50Nm each. As these motors are not built to be used on a wheelchair, a two-sided support structure and an adequate torque transmission between motor and frame were developed. The actuation and logic power supply is provided by a rechargeable battery (maxon motor AG, Switzerland) placed on the back of the wheelchair. To estimate the wheelchair's pitch ψ and the environmental inclinations α and β an Inertial Measurement Unit (IMU) (Sparkfun, USA) is used. The IMU is placed below the user's seat (Fig. 5) and rigidly attached to the wheelchair's frame.

The prototype remained close to the initial manual wheelchair. The weight lies around 30kg compared to 15kg before the modifications. The width of the wheelchair increased from 65cm to 75cm due to the motor support frame, but the other dimensions remained unchanged.

Evaluation

A multitude of tests indicate that the developed wheelchair is able to augment the user's force as well as his skills. For the sake of simplicity, we will focus in the following on the wheelie transition and stabilisation.

The goal of the transition control is to reach the equilibrium pitch as fast as possible, all while maintaining the forward translation as small as possible. The developed concept was successfully tested on flat ground with emulated user loads of 50kg (Fig. 6) and 75kg.

Subsequently, the wheelchair was tested in a user study with one paraplegic and seven able-bodied persons to further evaluate its performance and to ensure that the

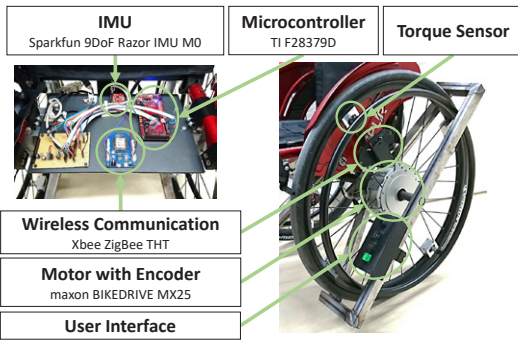


Fig. 5: Functional prototype's main modifications with respect to a conventional manual wheelchair.

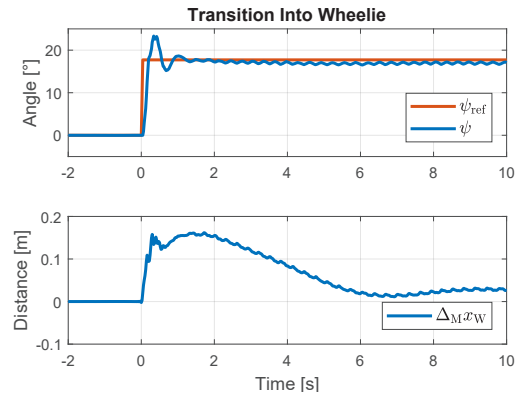


Fig. 6: Transition-Into-Wheelie performance test: pitch angle and covered linear displacement.

system's behaviour does not change compared to the tests with dummy masses. All the test pilots were able to perform the implemented functions, including the wheelie, successfully.

Conclusion

The goal of this work was to demonstrate that a minimal physical alteration of a manual wheelchair combined with state-of-the-art control methods can result in advanced assistance. The augmented wheelchair prototype presents features that can improve the autonomy of wheelchair users, by combining the low weight and manoeuvrability of a manual wheelchair with the support of an electric one. The employed admittance control is a promising approach for such devices, as it enables environmental compensation, and the wheelie feature has great potential for facilitating the navigation of daily-life obstacles. Our platform allows the further development and user evaluation of innovative control features to support wheelchair users in everyday life.

In summer 2016, two devastating earthquakes hit central Italy. The principle cause of deaths and injuries was not the earthquake itself but the destruction of a high number of buildings and roads as a consequence of seismic action. Thus, the major objective is to design structures that are able to absorb the released energy to limit any collapse of buildings where possible. The economic damage, as well as the loss of lives, should make engineers think of how to design structures that resist the damage caused by such natural hazards.

Prix d'excellence 2019

SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF STEEL MRFS DESIGNED WITH PREQUALIFIED BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS IN EUROPE_

Claire Kox

American and European Beam-to-Column Connections

It was the Northridge earthquake, on the 17th of January 1994 that contributed to major changes in designing steel structures and especially beam-to-column connections in the United States. The buildings sustained severe damage, often brittle failures of the welded moment-resisting connections. Thus, in order to avoid such brittle failures and improve the structures' ductility, an American standard that "specifies design, detailing, fabrication and quality criteria for connections that are prequalified" was put in place.

In Europe, "no reliable design tools exist to be able to predict the seismic performance of dissipative beam-to-column connections in order to meet code requirements" (Landolfo, 2013) and seismic building design is based on Eurocode 8. Hence, a research project, called the "European pre-QUALified steel JOINTS" (EQUALJOINTS), was put in place in order to compensate this missing part of EN1998-1. Its focus is on the introduction and standardization of design and manufacturing procedures in order for engineers to easily implement joints in steel structures.

In the framework of this study, the stiffened extended endplate beam-to-column connection (Figure 1) was analysed and implemented in a prototype building to evaluate its seismic behaviour.

Design Limitations According to AISC and EQUALJOINTS Project

A good ductile design against seismic loads enables the energy to be dissipated through plastic hinge regions that occur at some distance from the column faces through a flexural hinge at the beam's extremities and at the column base. In order to achieve a ductile design, one should first make sure that the steel cross-sections are section class 1 or 2, meaning the more the cross section is able to rotate, the more it shows a ductile behavior. Moreover, the beam's span-to-depth ratio is limited according to the behavior factor q (Table 1) and finally the cross section parameters are limited.

On the one hand, one should limit the width of bays in MRFS, as long spans contribute to a more flexible behavior. Consequently the cross-section sizes have to be increased to control drift. On the other hand, short spans should also be avoided because they tend to yield in shear but one prefers flexural yielding of beams.

The measurements depend on whether the building will be designed for a ductility class high (DCH) or medium (DCM).

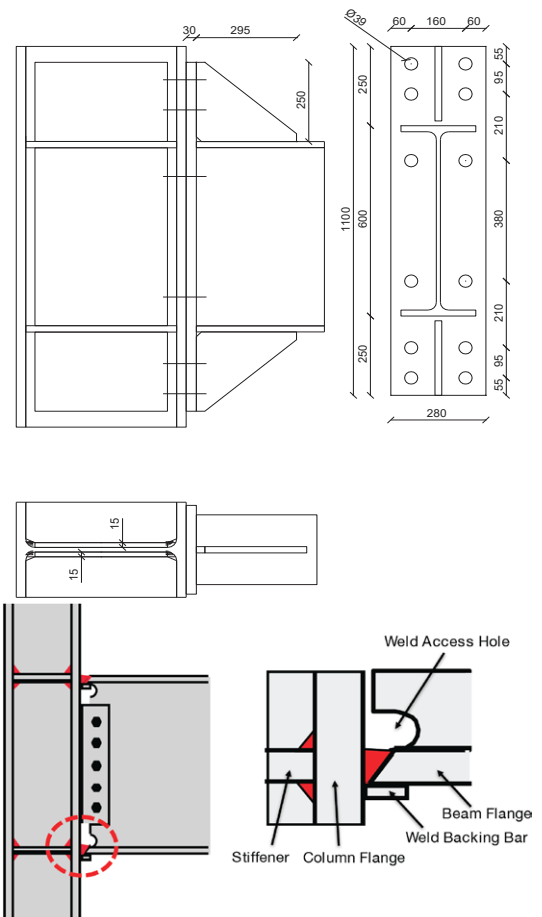
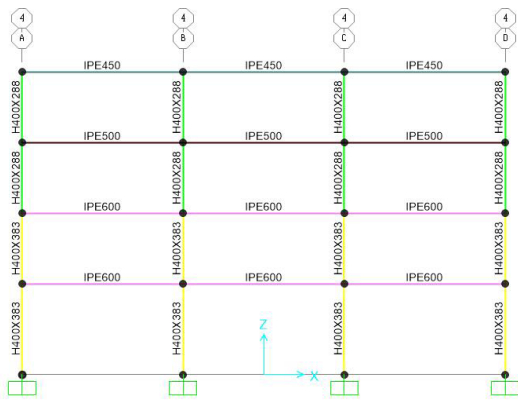


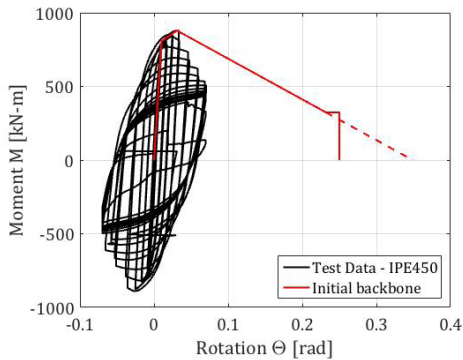
Fig. 1: Stiffened extended end-plate beam-to-column connection EQUALJOINT vs. typical beam-to-column connection before 1994

Thus, in the case of DCM ($q \leq 4$), for the same beam depth, the American code allows a smaller span length compared to the one that was tested in EU. On the contrary, for a DCH design ($q > 4$) the American code allows a slightly bigger spans compared to the spans tested in Europe. Consequently, the choice of cross-section with regard to span length is more limited in Europe than it is in the United States.

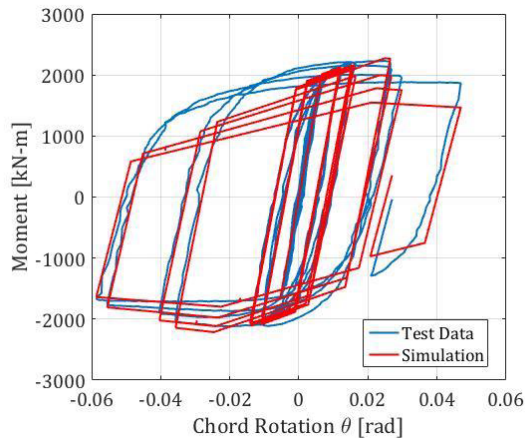
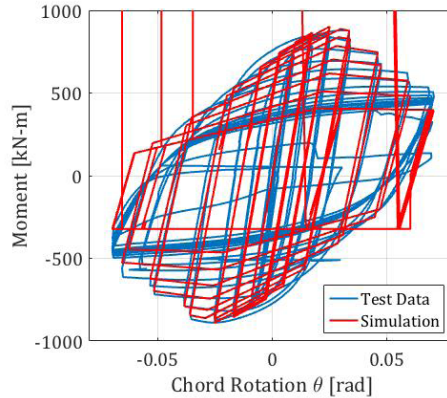
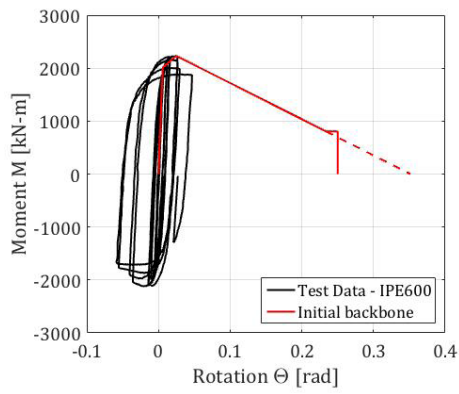
Comparing the different parametric limitations on prequalification, it was observed that the upper bound



_Fig. 2: Plan layout of the building and moment resisting frame profiles



_Fig. 3: Backbone curves and plastic hinge calibration



value in the US code is higher than the one in the European code. For the lower bound value, however, the European value is higher than in the American code. According to this range of values, the difference between the maximum values and the minimum values is smaller in the case for the European steel profiles. This means that the available choice of cross-sections is smaller compared to the choice one would have in the US and the sizes of the steel profiles are once again smaller in Europe compared to the US.

Seismic Design Assumptions

The objective of a seismic design lies in the definition of the steel cross-sections of a rectangular, 4-story office building. The structure was designed with four steel moment-resisting frames (MRFs) in the East-West loading direction and two eccentrically braced frames (EBFs) in the North-South loading direction. The story height is considered 4.5m for the ground story and 3.5m for the upper stories.

In the East-West loading direction, two lateral load-resisting frames are positioned at the perimeter of the building plan and two are positioned at the centre. The two remaining frames are considered to be gravity frames and their capacity to resist against lateral forces is to be neglected. Finally, it should be noted that no soil-structure interaction was studied therefore the support conditions of the ground floor are considered to be fully fixed.

The steel profiles were determined and verified according to the European codes, mainly Eurocode 3, Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, and EN1998-1 and are given in Figure 2

The structure was designed according to Italy's seismic zone 1 and soil type C. For DCH and cross-section class 1, the behavior factor $q = 6.5$. Thus, the fundamental period of the structure is $T_1 = 0.90$ sec with a spectral acceleration of $S_d/a_{gd} = 0.29g$, which is in the descendant branch of the response spectrum.

The permanent loads and imposed loads for the intermediate stories as well as for the roof are $G_k = 5.0kN/m^2$ and $Q_k = 3.0kN/m^2$ respectively. Additionally, each MRF has to resist a horizontal imperfection load $H_{sd} = 3.7kN$ and a total base shear $F_b = 496kN$, determined according to the equivalent lateral force method.

Design Criteria

Several verifications were done on the MRFs, with the most

limiting ones summarized in Table 2. Firstly, interstory drift coefficient θ ($\theta = \frac{P_{int} \cdot d_i}{V_{int} \cdot h}$), is considered in the calculations where gravity effects (also P- Δ effects) become important. This ratio should be $\theta < 0.10$, such that the P- Δ effects can be neglected. This, however, would be too severe and the θ coefficient was kept $\theta < 0.20$. In this case, it is therefore necessary to magnify the internal forces by a factor of $1/(1-\theta)$.

Moreover, the design interstory drift d_i is limited with respect to the Damage Limitation Requirement ($d_i \cdot v \leq 0.0075 \cdot h$). This limitation takes into account the interaction between the non-structural elements and the structure.

Finally, the overstrength ratio, $\Omega = \left(\frac{M_{pl,Rd,i}}{M_{B,Rd,i}} \right)$, is used to determine the additional strength that is present in the dissipative elements, namely the beams.

The various requirements; buckling, lateral torsional buckling, and strong column weak beam (SCWB) ratio, specified in the code were all verified with the aim of reducing the cross-section as much as possible. Had it been sufficient to verify only stability and section resistances, the cross sections could have been reduced. However, the interstory drift coefficient θ doesn't allow the decrease of the cross-sections. Since the beams have to control the deflection, MRFs undergo large displacements and it is the interstory drift coefficient θ that becomes the most limiting design criteria.

Steel Component Modeling and Calibration

The different modeling approaches used in the open source

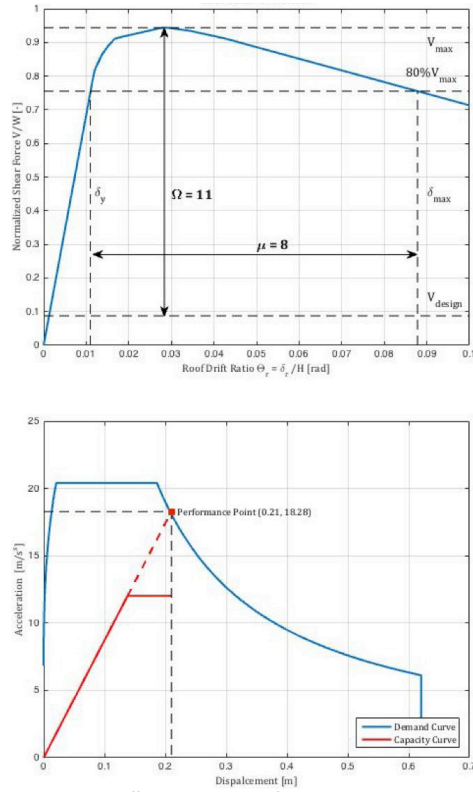


Fig. 4: Base shear coefficient & N2 method for near-collapse-limite state

software OpenSees are to determine the behavior of the various steel components. Based on the capacity design principles, the beams and columns that should remain elastic whereas the beam and column plastic hinges have to be designed in order to capture non-linear behaviour and thus are allowed to undergo plastic deformation.

The springs, located at the beams' and columns' extremities, have to be calibrated according to how the component deteriorates when subjected to numerous loading histories. In this study, the non-linearity was modeled with concentrated plasticity using plastic rotational springs. The deterioration model used has been developed by (Ibarra & Kravinkler, 2005) and defines the non-linear behavior as a multi-linear response characterized by the pre-capping plastic rotation θ_p , the post-capping rotation θ_{pc} and the strain-hardening ratio of the spring α_s .

The test data from the EQUALJOINTS project was used to calibrate the plastic springs. Figure 3 shows the backbone curves and calibration for the steel beam cross-sections: IPE450 (Figure 3 left) and IPE600 (Figure 3 right) necessary to define the IBK model. With the determination of the moment-rotation relationship it was possible to calibrate the beam springs accordingly and determine the deterioration parameter Λ that were used to model the prototype building.

Non-linear Static Analyses

The office building was modeled as a planar model, with a leaning column connected to it that has to take the effects of the gravity frame. The structure was subjected to a design-level earthquake (DLE) and a near-collapse seism (NC).

Figure 4 (top) shows the normalized pushover curve for the DLE and Table 3 summarizes the values for the ductility and the static overstrength. It is seen, based on the ductility coefficient that the structure shows more ductility than is prescribed in the EN1998-1. Furthermore, in terms of design, it has to be recalled that the non-dissipative members must be designed stronger than the dissipative ones. The overstrength ratio represents around 40% of this amplifying factor. Moreover, one also needs to verify the SCWB to be $\sum M_{rc} \geq 1.3 \sum M_{rb}$. According to the American code, the non-dissipative members are designed without considering the overstrength ratio and the SCWB verification should be $\sum M_{rc} \geq 1.0 \sum M_{rb}$. According to either design standard the sizing of the beam is generally drift-controlled and hence, the column size has to increase accordingly. In

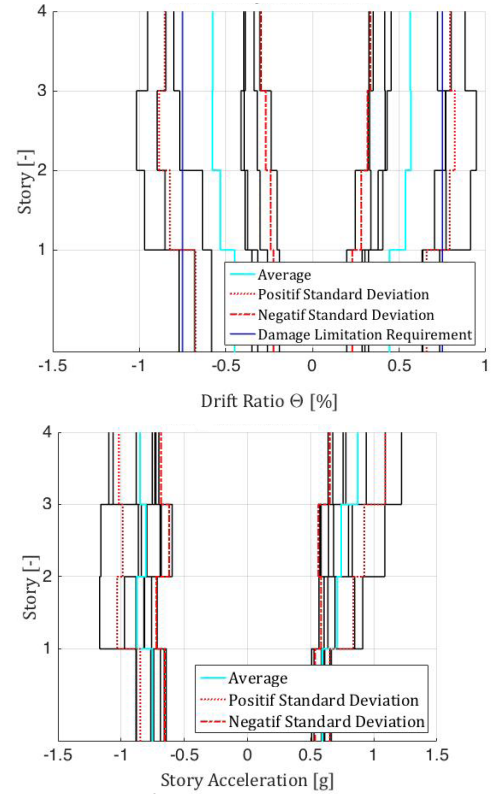


Fig. 5: Interstory drift ratios and accelerations per story

the European design, this means that in most cases the SCWB and the strength verifications are verified. In the US codes, however, since the columns are often subjected to high axial load, their flexural strength has to be reduced accordingly and thus, in order to meet the SCWB ratio and strength requirements, the columns have to be slightly increased. Thus, the European design results in a more conservative and stronger MRF design, which also explains why the structure remains elastic under a design-level earthquake.

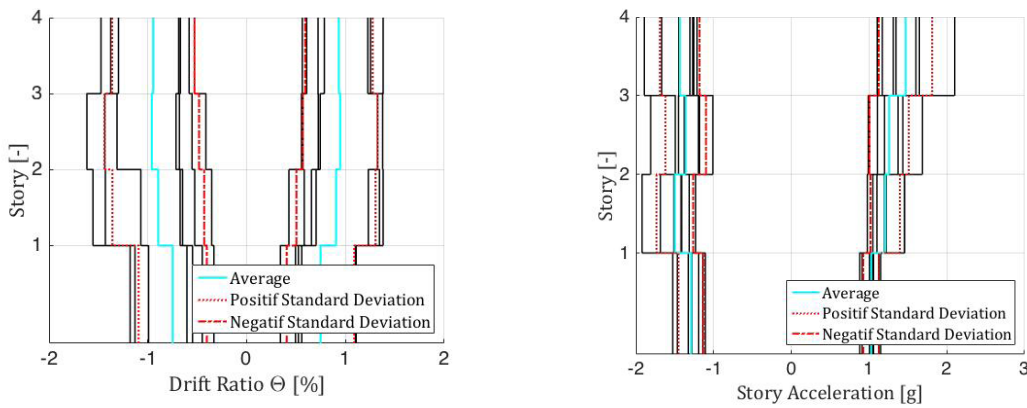
For the near-collapse limit state Figure 4 (bottom) the structural behavior does not remain elastic and thus it is known that some steel elements must have yielded.

Non-linear Response History Analysis

7 records were defined using the PEER Ground Motion Database (The PEER Center, 2013) and each ground motion was scaled to minimize the root-mean-square (RMS) difference of the normalized spectral accelerations of the records with respect to the target spectrum, over a period range from $0.2 T_1$ sec to $2.0 T_1$ sec.

Figure 5 shows the interstory drift ratio at each floor of the building as well as the acceleration per story (upper row for DLE and lower row for NC). Firstly, it can be seen that the drift is almost uniform along the height of the building, which means that all the stories work simultaneously. The aim is having a multistory sideway mechanism that contributes to the formation of plastic hinges in the beams. Secondly, it can be observed that in average the damage limitation state is met; $\theta < 0.75\% \cdot h_{story}$. For one or two ground motions, however the interstory drift can exceed this restraint and the structure might experience small damage. The interstory drift increases when the building is subjected to a NC seism, up to 1% on average, which corresponds to an increase of around 40% relative to the DLE.

Moreover, it can be seen that the average acceleration per story is around 0.6g. From the American Standard (ASCE 7-10, 2010) the story acceleration is limited to 0.3g. Above that limit, the probability is high that the acceleration-sensitive elements will be damaged in the event of a design-level earthquake. In a near-collapse limit state, the acceleration per story also increases by around 50% up to 1.2g. Consequently, not only will the drift-sensitive elements and acceleration-sensitive elements be damaged, but also the structure. Beam plastic hinges



_Fig. 5: Interstory drift ratios and accelerations per story

occur at the first three stories whereas the last story and the column bases remain elastic.

Conclusion

It was the building collapses and the severe structural damages after the Northridge earthquake in 1994 that contributed to major changes in the design of steel structures in the United States. Since then, several laboratory tests have been done in order to improve and predict the behavior of structures subjected to seismic actions. Thus, an engineer in the US needs to follow a step-by-step procedure that allows him/her to easily determine the different characteristics and parameters of the various steel elements. Such tools do not yet exist in Europe and this is the reason why the EQUALJOINTS project was put in place.

Firstly, the different steel cross-sections, the joint characteristics as well as the span-to-depth ratio were limited. Limiting these different parameters gives the designer not only a sample of cross-sections he/she is allowed to use; it also allows him/her to better predict the structural behavior. As far as these limitations are considered, the European engineer has a smaller sample available compared to the American engineer. Additionally, the American code allows the designer to reduce the seismic forces more effectively by allowing a certain structure to be more ductile. In Europe, however, the design codes are more prudent and don't allow the designer to take full advantage of the structure's ductility. Thus, it can be concluded that the requirements given by the Eurocodes are more conservative than the ones in the American standard and consequently the design is stronger.

References

- AISC-341, A. N. (2005). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- AISC-358, A. N. (2010). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. Chicago: American Institute of Steel Construction .
- Annex I, II & III. (Doc. ID: ANNEX I to D-WP1; Doc. ID: ANNEX II to D-WP1-4; Doc. ID: ANNEX III to D-WP1-4).
- D'Aniello, M., Constanzo, S., Tartaglia, R., & Ambrosino, G. L. (2016). *Annex II, Stiffened extended endplate specimens*. European pre-qualified steel joints (p. 11). Naples: University of Naples Federico II.
- Elghazouli, A., & Tsitos, A. (2014). *European pre-QUALIFIED steel JOINTS Provisional Design of Prototype Buildings & Selection of*

- Strong Motion Records*. London: Imperial College.
- Eurocode 1, E. S. (2002). *Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Eurocode 3, E. S. (2005). *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Eurocode 8, E. S. (2004). *Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Hamburger, R. O. (2009). *Facts for Steel Buildings - Earthquakes and Seismic Design*. American Institute of Steel Construction.
- Hartloper, A. (2016). *Updates to the ASCE-41-13 nonlinear modelling provisions for performance-based seismic assessment of new and existing steel moment resisting frames*. Montreal: McGill University.
- Ibarra, L. F., & Krawinkler, H. (2005). *Global Collapse of Frame Structures under Seismic Excitations*. Stanford University: Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER Report 2005/06 .
- Landolfo, R. (2013). *European pre-QUALIFIED steel JOINTS*. Retrieved 12 10, 2016, from Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II: <http://dist.dip.unina.it/2013/12/09/equaljoints/>
- Lignos, D. G. (2010, 03 19). *OpenSees Calibrator for Deterioration Models in OpenSees*.
- Lignos, D. G. (2016). *Seismic Design of Steel Moment-Resisting Frames - Design of Steel Columns*. EPFL - CIVIL435 Advanced Steel Design .
- Lignos, D. G. (2016). *Seismic Design of Steel Moment-Resisting Frames*. EPFL - CIVIL - 435 Advanced Steel Design .
- Lignos, D. G. (2016). *Seismic Design of Steel Moment-Resisting Frames Beam-to-Column Connection*. EPFL - CIVIL435 Advanced Steel Design.
- Lignos, D. G., & Al-Shawwa, N. (2013). *Web-Based Interactive Tools for Performance-Based Earthquake Engineering*. Retrieved 11 13, 2016, from <http://dimitrios-lignos.research.mcgill.ca/databases/index.php>
- Lignos, D. G., & Krawinkler, H. (2011). *Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading*. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 137, 1291-1302.
- Liu, J. (2013). *Moment Connections*. Retrieved 12 10, 2016, from Purdue University - CE-591 Advanced Structural Steel Design: https://engineering.purdue.edu/~jliu/courses/CE591/PDF/CE591MomentConn_F13.pdf
- Shahbazian, A. (2015). *European pre-QUALIFIED steel JOINTS*. Retrieved 12 10, 2016, from <http://www.ashahbazian.ir/2015/06/12/project-update-european-pre-qualified-steel-joints/>
- The PEER Center, U. o. (2013). *PEER Ground Motion Database*. Retrieved 05 16, 2017, from <http://ngawest2.berkeley.edu/>

Prix d'excellence 2018

KINETIK- UND GLEICHGEWICHTSBETRACHTUNG VON SILBER IM SiO_2 - CaO - Al_2O_3 -SCHLACKENSYSTEM_

Leonel Pereira

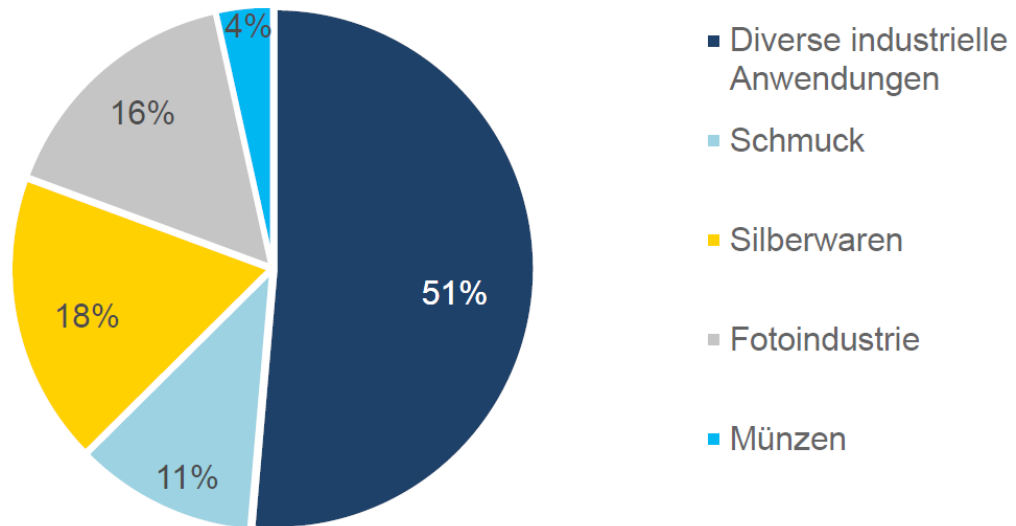


Abb. 1: Einteilung des produzierten Silbers aus sekundärem Material in den einzelnen Sektoren

Die Wiederverwertung von Edelmetallen spielt aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit der primären Rohstoffe aus erschöpfenden Lagerstätten, sowie deren wirtschaftlichen Relevanz eine zentrale Rolle. Dieser Artikel behandelt spezifisch die Rückgewinnung von Silber aus industriellen Abfällen durch einen pyrometallurgischen Prozess.

Silber wird heutzutage hauptsächlich aus der Primärroute, aus Zn/Cu/Pb-Erzen, gewonnen, wobei der darin durchschnittliche enthaltene Silbergehalt stetig abnimmt. Die Silberreserven der abbaubaren Lagerstätten werden von Experten auf 570000 t beziffert. Mit der Annahme, dass die Silbernachfrage für die kommenden Jahre konstant bleibt, ist mit einer Erschöpfung der Lagerstätten in den nächsten 20 bis 30 Jahren zu rechnen. Mit zunehmenden Volumen an E-Rücklaufmaterial nimmt das Potenzial für die Silbergewinnung zu. Von 2015 bis 2017 hat sich Europa als die größte Quelle von Silberschrott mit 1620 Tonnen etabliert. Besonders für westliche Industrieländer, die keine Erzlagerstätten besitzen, gestaltet sich die Recyclingroute als attraktive Alternative.

Silberhaltiges Recyclingmaterial stammt aus verschiedenen Sektoren, wie in Abbildung 1 dargestellt. Je nach Sektor unterscheidet sich der Wertmetallanteil und die stoffliche Zusammensetzung des Rücklaufmaterials wesentlich voneinander.

Die erreichbare Recyclingquote von Silber aus den Rücklaufmaterialien ist stark vom entsprechenden Produktsektor abhängig. Bei Materialien, die einen hohen Silbergehalt besitzen, wie z.B. Schmuck, Silberwaren und Münzen, werden hohe Recyclingquoten von über 90% erreicht. Im Gegensatz zu Elektronik- und elektrischen Schrotten, bei denen die Recyclingquote mit lediglich 10 – 15% beziffert wird.

In diesem Artikel ist insbesondere die Silbergewinnung von silberhaltigen Oxidresten aus diversen Industriezweigen von Interesse. Dieses Rücklaufmaterial ist von anorganischer Natur und fällt unter der Kategorie der industriellen Abfälle, die beim Fertigungsvorgang von diversen Produkten anfallen. Die anfallenden Mengen dieser Reststoffe sind jedoch nicht bekannt. Silber wird aus diesen Reststoffen durch pyrometallurgische Prozesse gewonnen. Hierbei liegt ein Schlacke-Metall-System vor, wobei idealerweise das Silber vollständig in der Metallphase vorliegt. Laut Industriedaten ist derzeit der Restsilbergehalt in der Schlacke beim Rückgewinnungsprozess dieser oxidischen Reststoffe jedoch zu hoch.

Aufgrund mangelnder Literatur zum vorliegenden Schlacke-Metall-System, besteht der Fokus in der vorliegenden Arbeit in der Charakterisierung des

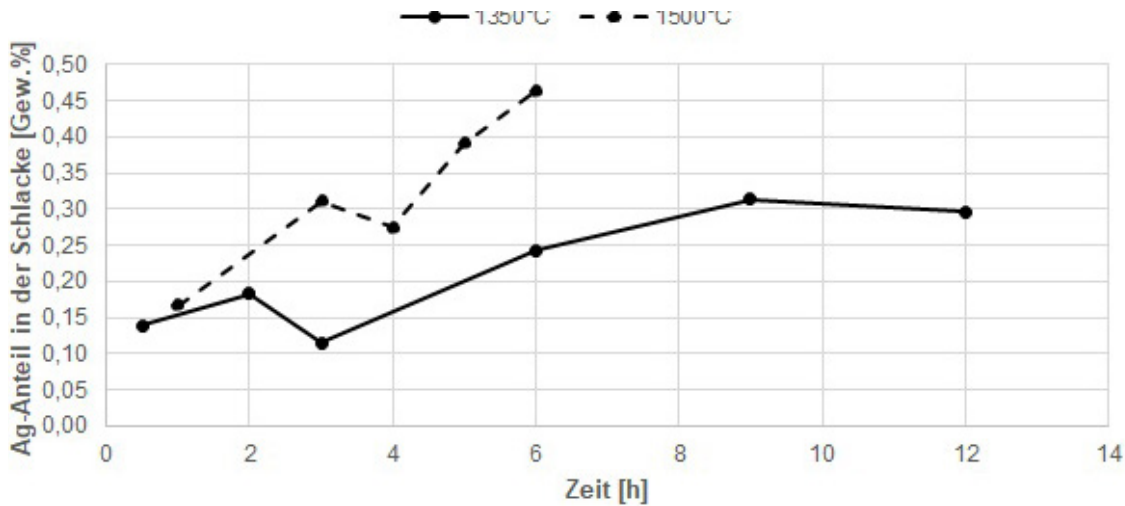


Abb. 2: Gelöster Silberanteil in der Schlacke in Abhängigkeit der Haltezeit mit den gemittelten Werten

Verhaltens von reinem Silber, welches mit einer 42 Gew.% SiO₂ – 40 Gew.% CaO -18 Gew.% Al₂O₃-Schlacke reagiert. Hierbei wird der Einfluss der Variablen Temperatur und Schlackenzusatz, auf die Silberlöslichkeit in der vorgegebenen Schlacke untersucht. Anhand der ermittelten Analyseergebnisse der Schlacken- und Metallphase wird der Verlauf der Silberverschlackung verfolgt.

Im Wesentlichen besitzt die Schlacke als Hauptaufgabe die Aufnahme von Verunreinigungen und Abschirmung des flüssigen Metallbades vor Oxidation durch die Atmosphäre. Bei der Auswahl des Schlackensystems muss sichergestellt werden, dass zusätzliche Anforderungen, die für die Silbergewinnung wichtig sind, erfüllt werden. Mit der obengenannten Zusammensetzung der Schlacke wird das beste Kompromiss zwischen eutektische Temperatur und Viskosität erreicht. Angestrebt wird hierbei eine niedrige Schmelztemperatur der Schlacke, wobei hingegen die Viskosität möglichst hoch sein soll.

Im Rahmen der Arbeit ist es wichtig zu wissen in welcher Weise das Silber in der Schlacke vorliegt. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Reaktionsmechanismus für die Auflösung von Silber in die Schlacke ermittelt. Es hat sich aus Literaturquellen ergeben, dass im stark basischen Bereich das Silber mit der Schlacke nach Gleichung (2) reagiert. Bei einer sauren Schlacke jedoch findet die Reaktion nach Gleichung (1) statt.

_1 Im sauren Bereich: $\text{Ag (l)} + 1/4 \text{O}^{-2} \text{(g)} \rightleftharpoons \text{Ag}^+ \text{(Schlacke)} + 1/2 \text{O}^{-2} \text{(Schlacke)}$

_2 Im basischen Bereich: $\text{Ag (l)} + \text{O}^{-2} \text{(Schlacke)} \rightleftharpoons \text{Ag}^{-2} \text{(Schlacke)} + 1/2 \text{O}_2 \text{(g)}$

Im sauren Bereich hat Silber die Rolle eines Sauerstoffakzeptors. Aus dem Sauerstoffmolekül wird durch die Reaktion mit Silber ionisches Silber und Sauerstoff gebildet. Im basischen Bereich reagiert das Silber mit einem Sauerstoffanion zu molekularem Sauerstoff und einem Silberanion. Silber hat in diesem Bereich die Eigenschaft eines Sauerstoffdonator.

Wird die Basizität nach der einfachen Formel $B = \text{CaO} / \text{SiO}_2$ unter Vernachlässigung des amphoteren Aluminiumoxides für die vorliegende Schlacke betrachtet, so liegt diese leicht im sauren Bereich mit $B = 0,95$. In diesem Basizitätsbereich wirkt Al₂O₃ bei Zugabe als ein saures Oxid. Somit wird angenommen, dass das vorliegende Schlackensystem einen sauren

Charakter besitzt. Das Silber wird dementsprechend nach Gleichung (1) verschlackt.

Für die experimentelle Versuche wird die Schlacke synthetisch hergestellt. Grund hierfür ist, dass die einzelnen Komponenten der Schlacke verschiedenen Körnungen und Dichten besitzen, welche zur Folge haben, dass mit bloßem mechanischem Mischen keine hinreichende Homogenität im gesamten Mischgut erreicht wird. Infolgedessen wird das Pulvergemisch eingeschmolzen, damit es im schmelzflüssigen Zustand vollständig homogenisiert vorliegt. Nach dem Erstarren der Schlacke, liegt diese in stückiger Form vor. In dieser Form ist die Schlacke für eine Portionierung im Grammbereich nicht geeignet, deswegen wird sie wieder in den Pulverzustand gebracht.

Als Ausgangsmaterial für die Versuchen werden die synthetische Basisschlacke und ein 99,99%iges Silbergranulat verwendet. Die beiden Rohstoffen werden nacheinander, zuerst Silbergranulat, anschließend die Schlacke in einem Aluminiumoxidtiegel chargiert. Anhand Vorversuche sind jeweils 80g aus Silber und Schlacke notwendig für eine optimale Versuchsdurchführung. Eine Versuchsreihe setzt sich aus sechs identisch Tiegeln gefüllt mit Silber und Schlacke, die in einem widerstandsbeheizten Ofen chargiert werden. Der Ofen wird auf eine definierte Temperatur bei konstanter Aufheizgeschwindigkeit gebracht. Nach Erreichen der Zieltemperatur, von 1350°C bzw. 1500°C, im Ofen werden in vordefinierten Abständen, von 30min bis 12h, die Tiegel nacheinander aus dem Ofen entnommen und an Luft erstarren lassen. Es werden zwei Temperaturen angefahren, um dessen Einfluss auf die Silberlöslichkeit in der Schlacke zu untersuchen. Für jede Temperatur wurde der Versuch drei Mal durchgeführt. Die Versuche bei 1500°C wurden bis maximal 6 Stunden durchgeführt, da bei längeren Haltezeiten das Aluminiumoxidtiegel sich zu stark verformte und ein Auslaufen der schmelzflüssigen Produkte riskierte.

Nach dem Erstarren der Proben wird die Silbermetallphase von der Schlackenphase getrennt. Die Schlacke wird anschließend aufbereitet, um die chemische Zusammensetzung mittels Röntgenfluoreszenz-Methode zu untersuchen.

Wie von Abbildung 2 zu entnehmen, ist die Löslichkeit von Silber in der Schlacke bei 1500°C deutlich höhere im Gegensatz zu 1350°C. Bei Betrachtung der Kurve für den Versuch bei 1350°C wird bei 9h Haltezeit ein Maximum der Silberlöslichkeit erreicht. Bei weiterer Haltezeit verbleibt die

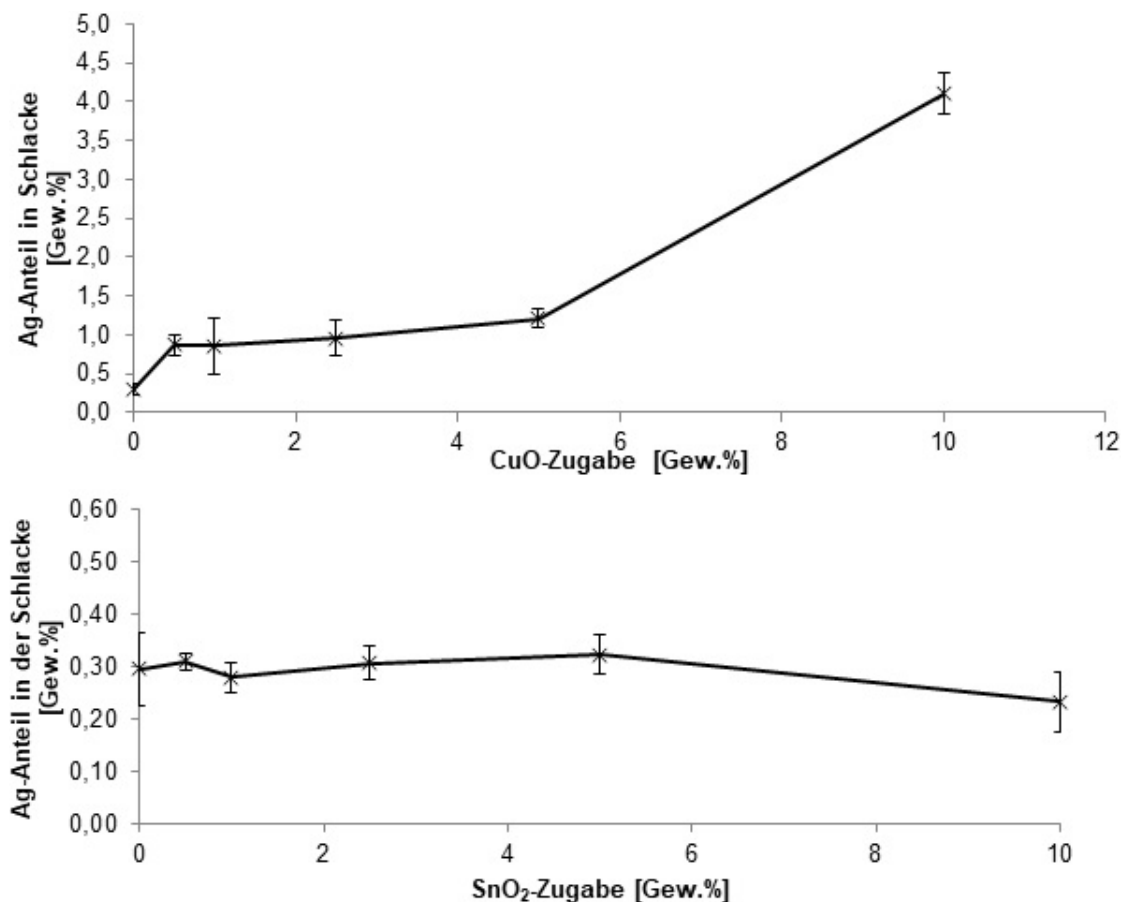


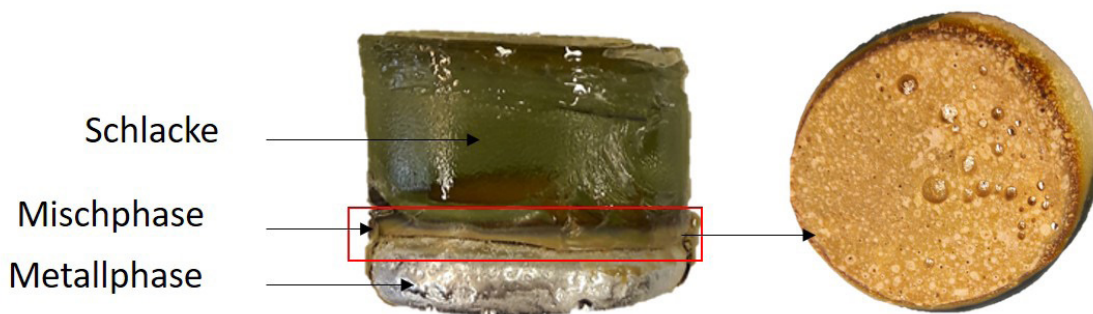
Abb. 3: Silberlöslichkeit in der Schlacke in Abhängigkeit der CuO- bzw. SnO₂-Zugabe

gemessene Löslichkeit konstant. Es ist hierbei anzunehmen, dass das Gleichgewicht zwischen Schlacke und Metallphase für das Silber bei 9h erreicht wurde. Beim Versuch bei 1500 °C hingegen steigt die Löslichkeit von Silber in der Schlacke auch nach 6h weiterhin zu. Die Haltezeit ist unzureichend damit sich bei diesen Bedingungen ein Gleichgewicht einstellt.

In den oxidischen Reststoffen sind verschiedene Oxide anderer Elemente beinhaltet, vor allem Kupferoxid und Zinnoxid. Aus diesem Grund wird der Einfluss dieser beiden Oxide auf die Silberlöslichkeit in der Schlacke untersucht.

Der Versuchsaufbau bleibt den vorherigen Versuchen identisch. Es werden Zusätze an CuO bzw. SnO₂ in fünf Stufen der Schlacke zugemischt. Das zweiwertige Kupferoxid, mit einer Reinheit von 99,7%, liegt wie auch die anderen Schlackenkomponenten als Pulver vor. Das Zinn(IV)oxidpulver besitzt eine Reinheit von 99,9%. Die Versuchsparameter für diese Versuchsreihen wurde mit einer Temperatur von 1350°C und Haltezeit von 12 Stunden, wie im vorherigen Versuch, festgehalten.

Beim Vergleich der beiden Verläufe der Silberlöslichkeit für die beiden Schlackenzusätze, Abbildung 3, ist



_Abb. 4: Darstellung der unterschiedlichen Phasen

ein eindeutiger Unterschied zu vermerken. Allgemein betrachtet, hat die Zugabe von Kupferoxid einen negativen Einfluss auf die Silberausbeute, aufgrund der höheren Mengen an Silber die verschlackt werden. Bereits geringe CuO-zugabe resultiert in eine Verdoppelung des gemessenen Silberanteils in der Schlacke. Bei SnO₂-Zugabe hingegen ist der Einfluss auf die Silberlöslichkeit in der Schlacke vernachlässigbar.

Eine weitere Interessante Beobachtung erfolgt nach der Trennung der Schlackenphase vom Tiegel. An der Grenzfläche zwischen Schlacke und Metallphase hat sich eine millimeterdicke Phase gebildet. Diese Phase wird als Mischphase bezeichnet. Diese Mischphase besitzt eine gelbliche Farbe, welche sich deutlich von der Schlacke unterscheidet (siehe Abbildung 4)

Von zentraler Bedeutung ist die Charakterisierung dieser Mischphase und der Vergleich mit der darüberliegenden Schlackenphase. Aus diesem Grund werden diese Phasen mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Übergreifend werden zwei wichtige Erkenntnisse aus den REM-Analysen gewonnen. Einerseits liegt in der Mischphase ein höherer Silbergehalt vor als in der Schlackenphase. Weiterhin werden metallische Silberpartikel unterschiedlichen Größen in der Mischphase vorgefunden. In der Schlackenphase hingegen werden keine metallische Silberpartikel mit den REM-Aufnahmen nachgewiesen. Dennoch haben Röntgenfluoreszenz-Analysen die Anwesenheit von Silber bestätigt. Silber liegt demnach in der Schlackenphase ionisch gelöst vor.

In den experimentellen Arbeiten wird die Temperaturabhängigkeit der Silberlöslichkeit anhand

von Versuchen, die bei zwei unterschiedlichen Temperaturen erfolgen, bestimmt. Im Fall einer Temperaturzunahme hat sich gezeigt, dass die Silberlöslichkeit der Schlacke zunimmt. Bei den Versuchen, die bei 1350°C abliefen, beträgt die Gleichgewichtskonzentration von Silber 0,310 Gew.%. Zum Erreichen dieses Gleichgewichtszustandes ist 9,7h Haltezeit notwendig gewesen. Durch Interpolierung der Versuchsergebnisse der 1500°C Versuchsreihe wird eine Reduzierung der Haltezeit zum Erreichen des Gleichgewichts auf 8,5h und Erhöhung der maximalen Silberlöslichkeit auf 0,481 Gew.% eingeschätzt.

Den zweiten Teil der experimentellen Versuche werden mit zunehmenden Zugaben von CuO bzw. SnO₂ in die Schlackenphase durchgeführt. Der Einfluss von CuO lässt sich von 0 bis 5 Gew.% linear mit steigender Silberlöslichkeit der Schlacke beschreiben. Bei den Versuchen mit Zinnoxidzugabe bleibt die Silberlöslichkeit bis zu 5 Gew.% SnO₂-Zugabe nahezu konstant und nimmt bei 10 Gew.% leicht ab.

Durch die gewonnenen Erkenntnissen wird der Wissensstand der Reaktion von Silber im CaO-SiO₂-Al₂O₃-Schlackensystem erweitert. Technisch betrachtet dienen die Ergebnisse zur Optimierung der Prozessparameter beim Recycling von silberhaltigen Oxidresten.

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 2019

USAGE OF INTER-SITE ELECTROMAGNETIC TRANSFER FUNCTIONS IN EXPLORATION FOR GEOTHERMAL RESOURCES: A 3D SYNTHETIC STUDY_

Marthe Faber

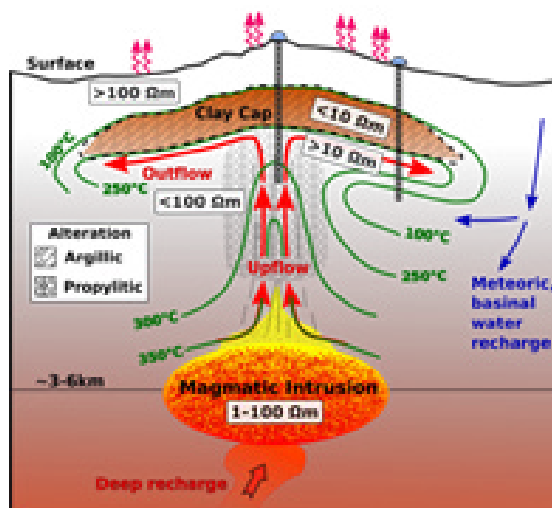


Fig. 1: Conceptual model of a high enthalpy volcanic geothermal system taken as basis for numerical experiment. ([Samrock, 2015])

Given the increasing energy consumption and the related air pollution and CO₂ emittance, the need for clean energy production is immediate. Therefore, there is a main interest and great demand to increase the energy production from renewable sources. Geothermal energy is an attractive alternative, as it is carbon-neutral and readily available in regions that may not have access to conventional energy sources ([Samrock, 2015]). The focus of this study lies with the localization of geothermal reservoirs and their imaging using a new magnetotelluric (MT) field setup technique. The magnetotelluric method is well suited to investigate a geochemical system in view of geothermal exploration due to its ability to characterize the main features of a reservoir based on electrical properties of the subsurface. This allows for the localization of e.g. shallow magma chambers, which are the main feature of interest in the analyzed hydrothermal system. MT is a dependable prospecting tool for geothermal reservoirs, as it reliably maps the subsurface conductivity up to a depth of several kilometres ([Munoz, 2014]).

A specific kind of geothermal reservoir is targeted in the following work: a high enthalpy geothermal system with temperatures above 150-200°C ([Munoz, 2014]), most commonly found in active volcanic regions like above hot spots, subduction zones and rift systems. Those systems are hydrothermal reservoirs and show a characteristic

temperature distribution defined through fluid flow originating from a hot magmatic intrusion and a resulting typical geology ([Flóvenz et al., 2005]), which allows to conceptualize this type of geothermal reservoir (Figure 1). Depending on the temperature different hydrothermal alteration products are formed, which show large differences in their electrical conductivity. Given the high dependency of electrical conductivity not only on electrical rock properties but also on physical properties such as temperature, a MT field campaign permits recording of characteristic surface conductivity values for such a typical high-enthalpy hydrothermal system. A major aim of exploration for geothermal resources is to reliably identify regions where geothermal heat can be extracted. This conceptual reservoir model built upon exploration data minimizes the uncertainty of project failure of a plant and thereby financial risks ([Samrock, 2017]). In order to ensure further progress in the domain of geothermal exploration, this study proposes a new MT acquisition survey layout that allows for time and cost-efficient, optimized geophysical prospecting.

Magnetotellurics is based on the simultaneous measurement of the total electromagnetic (EM) field, meaning the time variation of both the magnetic field $B(t)$ and the induced electric field $E(t)$ ([Naidu, 2012]). The electrical conductivity of the underlying material can be determined from the linear relationship between the horizontal components of the measured electric (E) and magnetic field (B) variations. This relationship is called a transfer function and can be specifically written down as an impedance tensor (Eq. 1).

During a standard MT survey layout, the electric and magnetic field components need to be measured at each receiver station, also called field site, in order to calculate the local impedance tensor. As the following work concentrates on the modeling of a three dimensional conductivity structure in the Earth, the local transfer function concept is introduced in the 3-D case with E : electric field, H : magnetic field, Z : impedance tensor, r_f : field site and ω : angular frequency.

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}_f, \omega) = \mathbf{Z}(\mathbf{r}_f, \omega) \mathbf{H}(\mathbf{r}_f, \omega) \quad \text{with } \mathbf{Z}(\mathbf{r}_f, \omega) = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}; \mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}; \mathbf{H} = \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

The challenge in such surveys is that magnetic field measurements are very expensive and tedious to undertake when compared to electric field measurements. The field instruments used to measure the magnetic

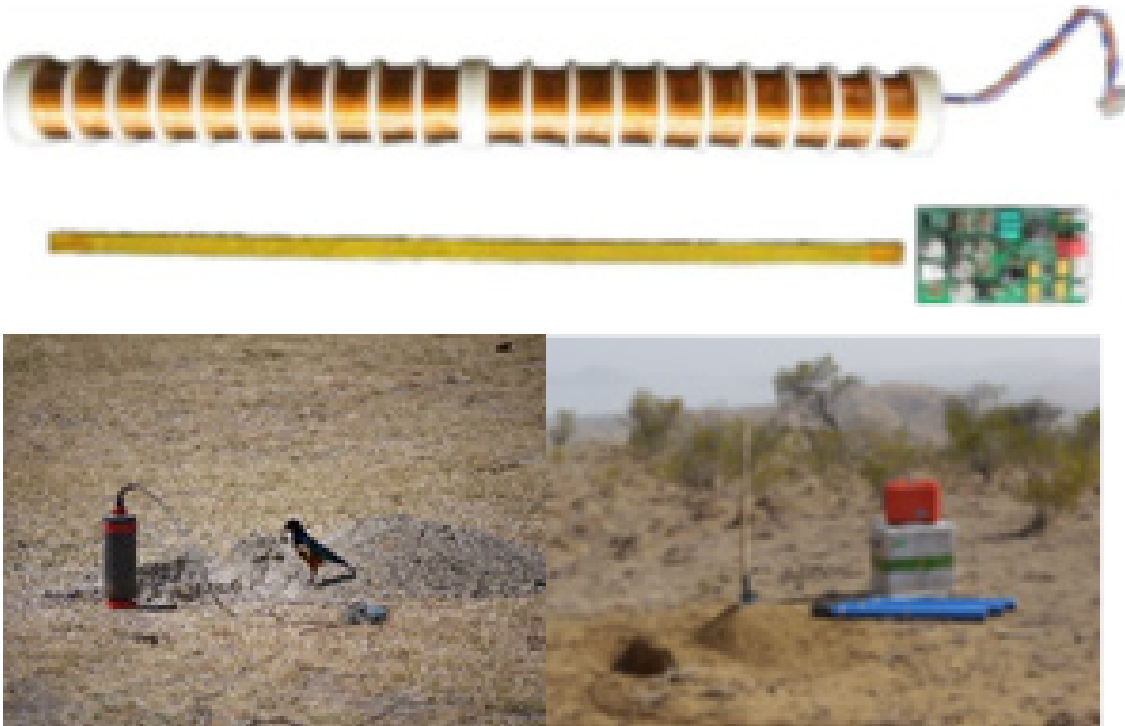


Fig. 2: Inside view of an induction coil magnetometer (modified after (Liu et al., 2015)). The induction coil is built up by three layers of high permeability material (permalloy) and one layer of windings made out of high conductive material (copper)(Liu et al., 2015) sealed within a shock resistant casing ((Simpson and Bahr, 2005)). Field Setup of the telluric (left) and magnetic (right) part of a full MT station.

field are induction coil magnetometers. For a frequency range of 0.0001-10000Hz, the costs of one broadband induction coil amount up to €6000 (MFS-06e, [Geophysics and Group, 2018]). To achieve a large induced voltage V , induction coils need many coil windings in series and highly permeable iron cores to increase the flux (Figure 2, above), which entails that induction coils are heavy in weight. Another limiting factor is a required small tube diameter which increases the length of the coil. Magnetic field stations are thus unhandy to carry and install ([Kuvshinov et al., 2018]). The used electrodes are far less expensive (costs about €100 ([Andras, 2009] and [WOLF, 2018])), smaller and lighter to carry, hence easier and faster to install (Figure 2). The time needed to install a full magnetotelluric (magnetic and electric) station amounts up to about 2h for which the telluric part is set up in only about 30min.

This study aims to evaluate a possible strategy how to:
 _Reduce the costs of the magnetotelluric field setup
 _Increase the efficiency of the EM measurements through assuring faster field setup: a denser receiver grid can be carried out or a larger receiver area covered in the same time as with the standard field technique

The concept of so-called inter-site transfer functions is applied to the MT field setup in order to optimize the traditional, local survey layout (Figure 4, A) without losing information about the sub-surface. The application of an inter-site concept in a MT field survey (Figure 4, B) is motivated by the observation that electric field variations have a higher dynamic range than the magnetic field variations, which means that the electric field contains more information about the subsurface.

The electric field measurements are thus more decisive for the interpretation of the conductivity structure of the Earth than the magnetic field measurements. Therefore, in the inter-site field setup, the horizontal components of the electric field are measured at all the field sites ([Bakker et al., 2015]), whereas the horizontal magnetic field components are measured only at one (or a few) of the field sites which is recorded as the base site value.

The used inter-site impedance tensor (Eq. 2) requires simultaneous recording of the horizontal magnetic field components at a chosen base site r_b and the horizontal components of the electric field at a field site r_f [Bakker et al., 2015].

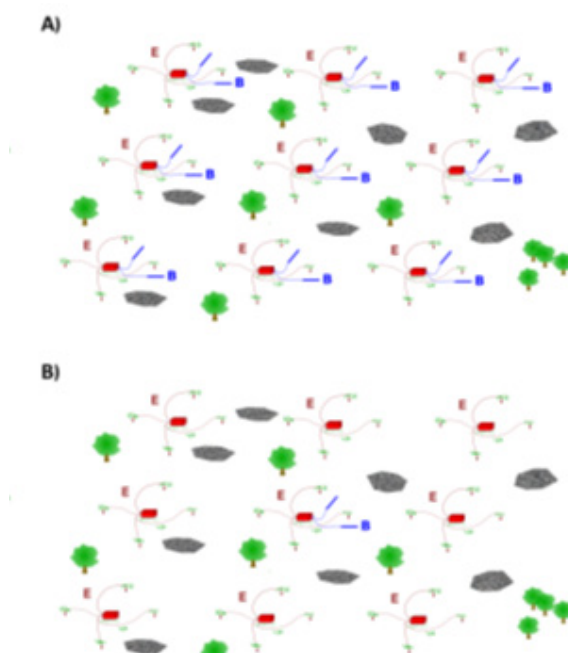


Fig. 4: Local (A) vs. inter-site (B) MT survey setups. A) For the local setup, electric and magnetic fields are measured simultaneously at all the receiver stations. B) For the inter-site setup, electric fields are measured at all the receiver stations whereas the magnetic field is measured simultaneously at only one base station (for the extreme case).

$$E(r_f, \omega) = Z^i(r_f, r_b, \omega)H(r_b, \omega) \quad \text{with} \quad Z^i(r_f, r_b, \omega) = \begin{pmatrix} Z_{xx}^i & Z_{xy}^i \\ Z_{yx}^i & Z_{yy}^i \end{pmatrix}$$

The aim is to construct a 3-D model, similar to the previously introduced hydrothermal system (Figure 1) and calculate the local and inter-site responses in order to test their similarity for this specific geological example. In a forward model problem, a model m is given in order to predict data d through the relationship $d = F(m)$, with F being an operator representing the governing equations relating the model and the data ([Maurer, 2017]). In this case, the model contains information about the subsurface conductivity structure and the forward modeling process predicts the data that are recorded at the receivers at the Earth's surface. The governing equations are discretized following the finite element scheme [Grayver and Kolev, 2015]. Several models of different complexities are investigated to assess the efficiency of the inter-site setup. In this case, the most complex model of this study is taken as an

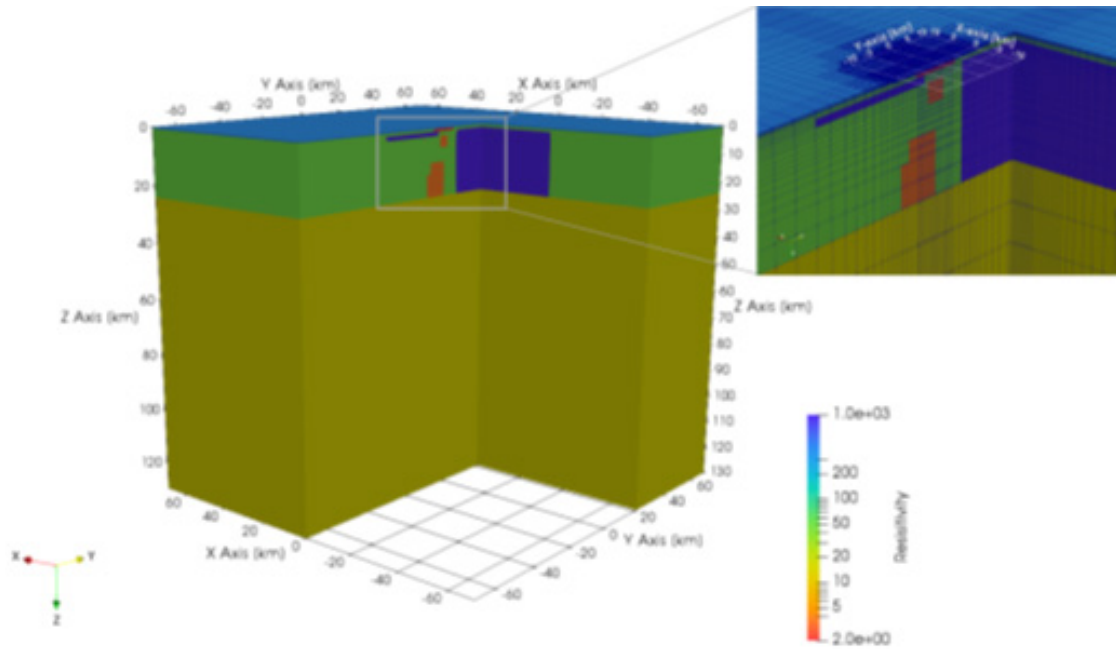


Fig. 5: Perspective inside the high subsurface complexity MV. Crosscut through plane $x=0, y=21294\text{m}$ and through plane $x=0, y=0\text{m}$. The whole model domain is represented (left) without the overlaying 70km thick layer of air. A zoom into the area of interest (right) shows a close up of the important conductivity structures. The inner cells of the forward model mesh and the receiver field ($20 \times 20\text{km}^2$) are shown for reference.

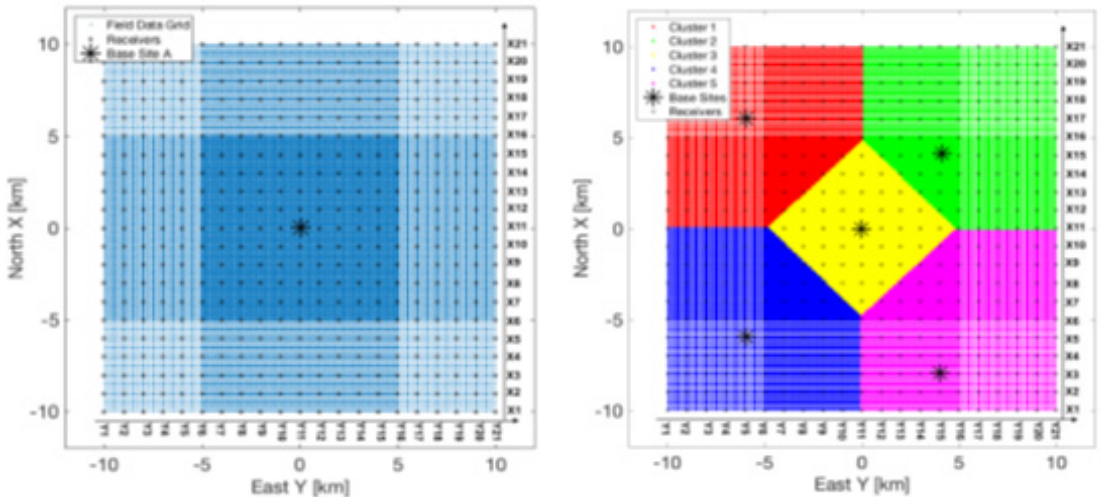


Fig. 6: Grid and 441 receiver stations on a $20 \times 20\text{km}^2$ area and spaced 1km apart for a 1-base (left) and 5-base clustering scenario (right).

Material	Conductivity [S]	Resistivity [$\Omega \text{ m}$]
Air	1e-9	1e+9
Sediments	0.0025	400
Clay	0.5	2
Basement	0.02	50
Magma	0.3	3.3
Asthenosphere	0.07	14
Resistive Basement	0.001	1000

Tab. 1: Conductivities and resistivities of the building materials of Model V.

example because it resembles the pattern of high-enthalpy geothermal systems (Fig. 1) very closely: Model V (MV) consists of a 500m thin sediment layer (blue), underlain by a clay cap (red) and two magma chambers (orange). A heterogeneity in the basement's (green, dark blue) resistivity is assumed. The rest of the model domain is given by the asthenosphere (brown). The corresponding resistivity values can be found in Table 1.

Local and inter-site synthetic data are produced for Model V at 35 different frequencies spanning from 229Hz to 0.001Hz. To assess the viability of the inter-site setup, various base station scenarios are tested, two of which are depicted in Figure 6.

The information content of local and inter-site transfer functions of Model V are compared through calculating

the similarity between the two impedance tensors. In order to evaluate the similarity, the difference between the local and inter-site response Z_i is normalized over the local response Z . The similarity is calculated at all the field sites for each frequency of the investigation range. The mean value is taken over the whole frequency range. The numerical modelling results are shown for the 1-base scenario (Fig. 7) and for the 5-base clustering scenario (Fig. 8).

From Figure 7 and 8 it becomes obvious that for a given model complexity, the similarity distribution depends on the location of the base station in respect to the underlying conductivity structures. The high complexity model MV of this synthetic study is of close resemblance to the actual conceptual model of a high-enthalpy hydrothermal system. Hence, this model has a high relevance in order to evaluate the suitability of the inter-site method to an actual field application for geothermal prospects. A promising level of ideal similarities (Fig. 7 and 8, above) are obtained for both base layout scenarios above the area of interest of Model V and only small deviations of local and inter-site responses (Fig. 7 and 8, below) can be observed within the period range necessary for the depth detection of the targeted magma chamber.

From this base station layout evaluation, it can be suggested that in order to achieve a good sub-surface image of the hydrothermal system, a clustering scenario should be considered for the the inter-site setup given that

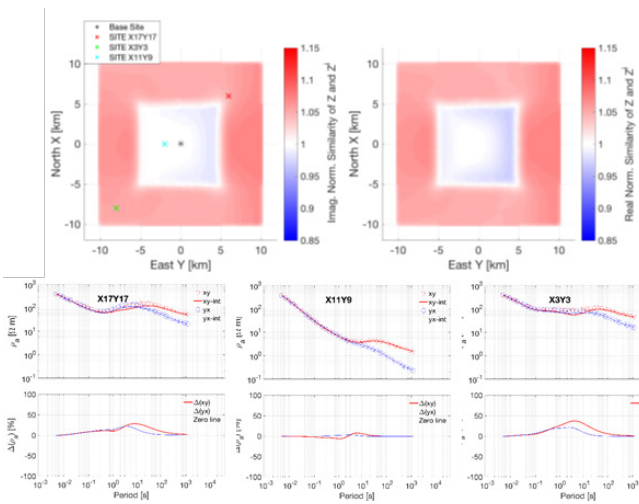


Fig. 7: Similarity map of local and inter-site impedance tensor of model MV: 1-base station scenario. Local and inter-site apparent resistivity at site X17Y17, X11Y9 and X3Y3 of model MV for the 1-base station clustering scenario. (Below) The difference between local and inter-site data is calculated for the off-diagonal elements and indicated in %.

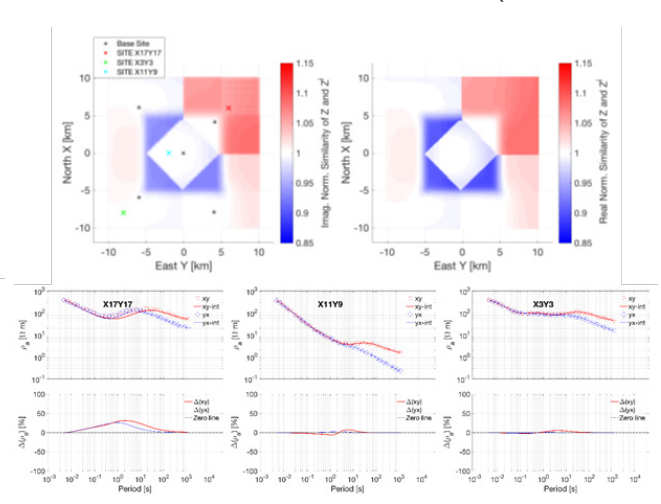


Fig. 8: (Above) Similarity map of local and inter-site impedance tensor of model MV: 5-base station clustering. Local and inter-site apparent resistivity at site X17Y17, X11Y9 and X3Y3 of model MV for the 5-base station scenario. (Below) The difference between local and inter-site data is calculated for the off-diagonal elements and indicated in %.

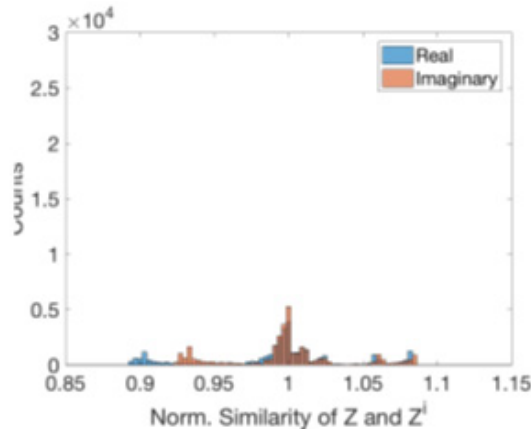
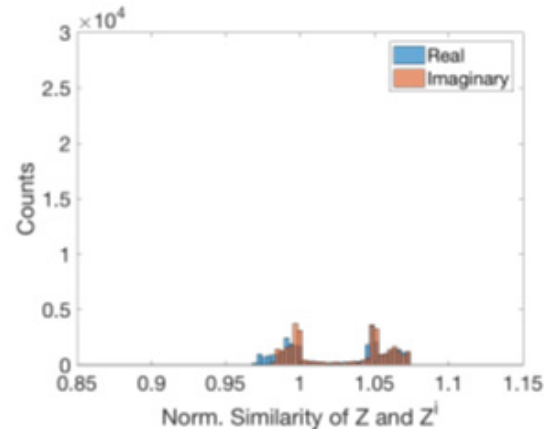


Fig. 9: Histogram of local and inter-site impedance tensor of model MV: 1-base station layout (left) and clustering scenario (right).

the overall similarity agreement improves with the number of base stations (Fig. 9). Several base stations are thus favourable for models of high complexity grade.

Overall, the results obtained from the tested scenarios yield promising similarities between local and inter-site data and allow to synthetically demonstrate that the inter-site concept is well applicable to a field study in view of geothermal exploration. Realistic inter-site scenarios of course will be less drastic than this proof of concept for 1-base or 5-base scenarios of a whole 441 stations field setup. For example, a base site is paired with a few (e.g. 4) neighbouring electric field sites. This already speeds up measurements dramatically, since installation of a full MT site takes 2 h whereas a telluric station only needs 30 min. The installation of one of these inter-site clusters (one base station and 4 telluric stations) takes 4 h compared with the 10 h necessary to install 5 full MT stations. By effectively using inter-site transfer functions, the number of H-field stations can thus be reduced considerably compared to the traditional MT field-survey setup and hence allow to save costs and time in field work.

[Andras, 2009] Andras, S. (2009). Nonpolarizing electrodes. [Bakker et al., 2015] Bakker, J., Kuvshinov, A., Samrock, F., Geraskin, A., and Pankratov, O. (2015). Introducing inter-site phase tensors to suppress galvanic distortion in the telluric method. *Earth, Planets and Space*, 67(1):160. [Flóvenz et al., 2005] Flóvenz, Ó., Spangenberg, E., Kulenkampff, J., Árnason, K., Karlsdóttir, R., and Huenges, E. (2005). The role of electrical interface conduction in geothermal exploration. In *Proceedings of the 2005 World Geothermal Congress*, pages 24–29. [Geophysics and Group, 2018] Geophysics, M. and Group, A. T. (2018). Broadband induction coil mfs-06e. [Grayver, 2015] Grayver, A. V. (2015). Parallel three-dimensional magnetotelluric inversion using adaptive finite-element method. part i: theory and synthetic study. *Geophysical Journal International*, 202(1):584–603. [Kuvshinov et al., 2018] Kuvshinov, A., Grayver, A. V., and Samrock, F. (Spring 2018). Deep electromagnetic studies of the earth. *Lecture Slides and Script - Institute of Geophysics, ETH Zurich*. [Liu et al., 2015] Liu, K., Zhu, W., Yan, B., Liu, L., and Fang, G. (2015). Ultralow noise preamplifier and optimization method for induction magnetometers. *IEEE Sensors Journal*, 15(6):3293–3300. [Maurer, 2017] Maurer, H. (2017). Inverse theory for geophysics i: Basics. *Lecture Slides ETH Zurich*. [Munoz, 2014] Munoz, G. (2014). Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods. *Surveys in geophysics*, 35(1):101–122. [Naidu, 2012] Naidu, G. D. (2012). Deep crustal structure of the Son-Narmada-Tapti lineament, central India [electronic resource]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. [Samrock, 2015] Samrock, F. (2015). Constraints on the source of unrest at the Aluto-Langano geothermal field, Ethiopia, inferred from 3-D interpretation of MT measurements. PhD thesis, ETH Zurich. [Samrock, 2017] Samrock, F. (2017). Electromagnetic sounding methods in geothermal exploration. *Lecture Slides ETH Fall Semester (Course number 651-4109-00)*. [Simpson and Bahr, 2005] Simpson, F. and Bahr, K. (2005). *Practical Magnetotellurics*, page 15. Cambridge University Press. [WOLF, 2018] WOLF, C. L. (2018). Nonpolarizing electrode.

Die intermittierende pneumatische Kompression (IPK) dient der Therapie von Lymphödemen. Die praktische Umsetzung erfolgt als Funktionsmuster, bestehend aus Manschette, pneumatischem System, Sensorik und Steuereinheit. Das System kann durch In- und Deflation den Kompressionsdruck jeder einzelnen Kammer einer Manschette mit Mehrstufensystem kontinuierlich regeln.

Prix d'excellence 2019

FUNKTIONSMUSTERERSTELLUNG EINES SYSTEMS ZUR INTERMITTIERENDEN PNEUMATISCHEN KOMPRESSION

Yann Faber



Abb. 1: Lymphödem der oberen Extremität [1]

Motivation und Medizinische Grundlagen

Die Behandlung eines Mammakarzinoms durch Entfernung der axillären Lymphknoten resultiert in vielen Fällen in Schwellungen im Bereich der oberen Extremitäten durch Lymphödem (Abb. 1) [2]. Im unbehandelten Zustand ist das Lymphödem eine fortschreitende chronische Erkrankung. Der Krankheitsverlauf lässt sich aber durch eine konsequente Therapie günstig beeinflussen [3]. Die Lebensqualität der Patientinnen und Patienten ist auch nach der Operation oder der Bestrahlungstherapie oft langfristig verschlechtert, etwa weil die erweiterte adjuvante Behandlung mit der intermittierenden pneumatischen Kompression (IPK) die Bewegungsfreiheit der Betroffenen maßgeblich einschränkt. Aus diesem Grund soll ein System entwickelt werden, das eine wirksame Therapie ermöglicht und gleichzeitig mobil nutzbar ist. Dadurch könnten erkrankte Personen wieder mehr am gesellschaftlichen Leben teilhaben.

Das Lymphgefäßsystem übernimmt parallel zum Venensystem in erster Linie eine lymphableitende Funktion [4]. Pathologien dieses können durch eine Störung des Flüssigkeitstransports entstehen. Wenn das Lymphgefäßsystem nicht die Kapazität besitzt, die ausreichende Menge an interstitieller Flüssigkeit abzutransportieren und es zum Rückstau dieser lymphpflichtigen Last kommt, liegt eine Insuffizienz vor. Ist diese Insuffizienz mechanischer Natur, spricht man vom Krankheitsbild Lymphödem [5].

Die konservative Therapie von Lymphödem ist die Komplexe Physikalische Entstauungstherapie (KPE). Dabei soll unter anderem die Lymphangiomotorik

angeregt werden, um so die Transportkapazität des Lymphgefäßsystems zu steigern. Bei der Kompressionstherapie, die Teil der KPE ist, wird Druck von außen auf die Lymphgefäße ausgeübt, was bei flüssigkeitsreichem Gewebe zu einer Umverteilung der Lymphe führt. Zur Druckausübung eignen sich Kompressionsbandagen mit Druckgefälle von distal nach proximal und die IPK als adjuvante Therapieform zur KPE [4, 6]. Die IPK ist die apparative Anwendung pneumatischer Wechseldrücke in eine luftgefüllte Manschette, die über zu behandelnde Gliedmaßen gestülpt ist. Der Druck wird mithilfe einer elektrischen Pumpe erzeugt. Sie dient der Entstauungstherapie und trägt so zur Reduktion des Lymphödems bei [6].

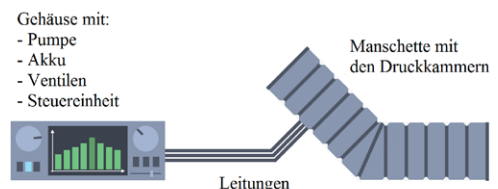


Abb. 2: Darstellung des Systems bestehend aus Manschette und Gehäuse [7, p. 43]

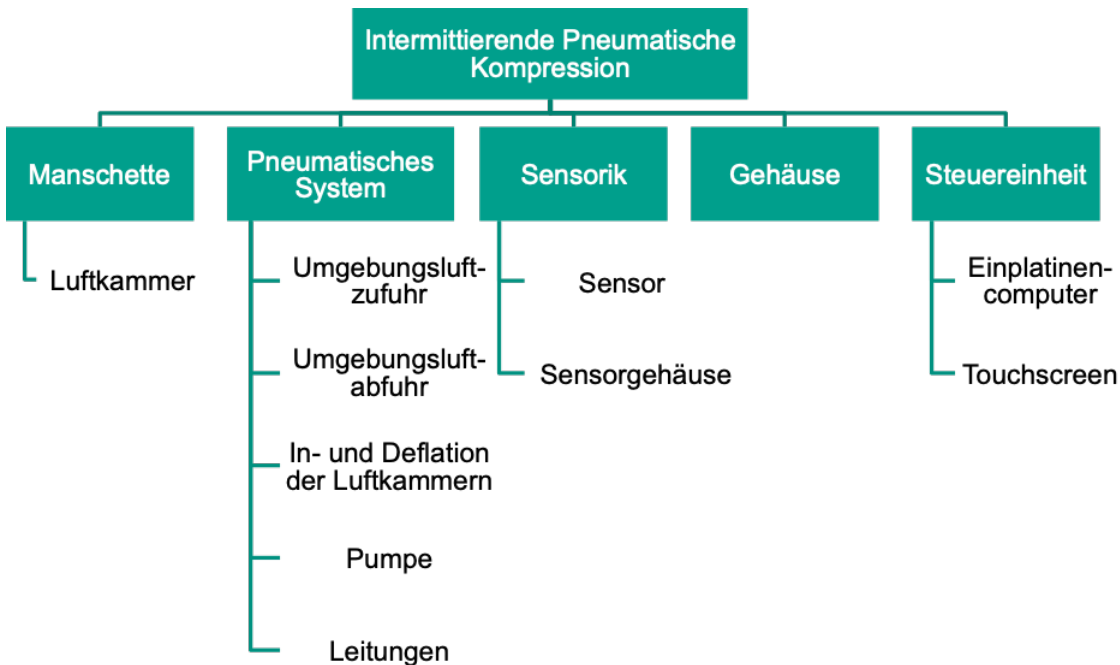
Konzepterstellung

Die Erstellung des Konzeptes eines innovativen, portablen Systems zur IPK erfolgte im Rahmen einer vorangegangenen Abschlussarbeit (Abb. 2) [7]. Dieses Konzept berücksichtigt die Transportierbarkeit sowie die Möglichkeit der mobilen Nutzung des Systems und stellt Vorgaben an den Aufbau der Manschette und die Einstellbarkeit des ausgeübten Drucks.

Hierauf aufbauend wird das Zielsystem in Elemente aufgeteilt, denen jeweils die Erfüllung einer spezifischen Funktion zugeteilt werden kann: Manschette, Pneumatisches System, Sensorik, Gehäuse und Steuereinheit (Abb. 3). Diese werden einzeln analysiert und anschließend wird eine Entscheidung für eine bestimmte Variation des Objektsystems getroffen. Im Folgenden soll das Vorgehen bei der Bearbeitung einzelner Elemente kurz erläutert werden.

Manschette

Die Manschette fungiert als Verbindungsglied zwischen dem maschinell durch eine Pumpe aufgebrachtem Druck, und der Ausübung dieses auf den Körper. Sie besteht aus Luftkammern, die über Leitungen mit Luft gefüllt



_Abb. 3: Hierarchische Aufteilung in Elemente

werden. Deren Expansion infolge der Inflation bewirkt, dass Druck auf die Gliedmaße ausgeübt wird und sich das darin befindliche Lymphgefäßsystem nach proximal entleert.

Für die präzise Erfüllung der Vorgaben an die Manschette wäre eine voraussichtlich aufwendige Eigenanfertigung erforderlich. Hierauf wird bei dieser Arbeit verzichtet und so wird ein möglichst geeignetes, verfügbares Zukaufteil erworben, welches allerdings für ein mobiles System im späteren Stadium unzureichend ist.

Da Eigenschaften wie die Mindestleistungsstärke der Pumpe und der minimale Innendurchmesser der Leitungen und der Ventile abhängig von der verwendeten Manschette ausgelegt werden, wird der maximal zu bewältigende Volumenstrom für den vom Hersteller der Manschette praktizierten Entstauungszyklus berechnet.

Der Volumenstrom ist direkt von der Manschette abhängig und vergleichsweise hoch. Bei Verwendung einer modifizierten Manschette mit reduziertem Luftkammervolumen in einem späteren Stadium wäre der erforderliche maximale Volumenstrom geringer, was einen direkten Einfluss auf die Auswahl der weiteren Komponenten hat.

Pneumatisches System

Die Baugruppe des pneumatischen Systems verbindet die Umgebungsluft mit der Manschette. Der Druck soll in einem vorgegebenen Bereich einstellbar sein und der zuvor berechnete Volumenstrom soll erreichbar sein. Der allgemeine, maximale Druck sollte jederzeit einstellbar sein und die selektive, lokale Druckerhöhung und -senkung sollte jederzeit möglich sein.

Die aktive Deflation der Luftkammern durch Ansaugen der Pumpe ermöglicht die Einstellung der Geschwindigkeit und garantiert die Zuverlässigkeit der Deflation. Somit wird zur Förderung des Mediums eine Pumpe mit zwei Anschlüssen für getrennten Lufteinlass und Luftauslass gewählt. Für den Transport der Luft zwischen den Elementen des pneumatischen Systems werden Schläuche verwendet, da diese gegenüber Rohren den Vorteil der höheren Flexibilität haben, was eine größere Gestaltungsfreiheit erlaubt.

Bei der Analyse des geforderten Systems können 4 Fälle unterschieden werden, die unterschiedliches Verhalten des pneumatischen Systems erfordern.

_1. Leerlauf: Die Pumpe läuft, aber um die ungewünschte Inflation der Luftkammern zu vermeiden, soll die aus der Umgebung geförderte Luft zurück in die Umgebung gefördert werden.

_2. Inflation (Abb. 4): Die Luft wird aus der Umgebung in die Luftkammern gefördert.

_Deflation (Abb. 5): Die Luft wird aus den Luftkammern in die Umgebung gefördert.

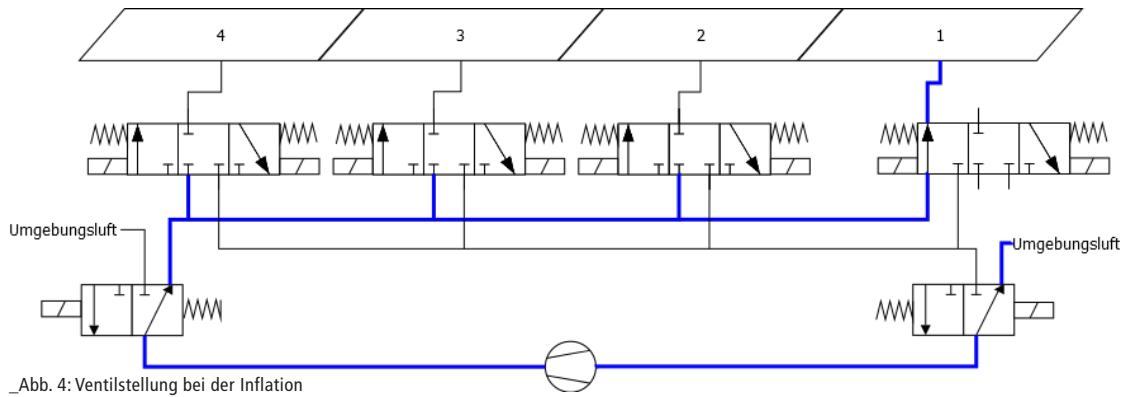
_3. Simultane In- und Deflation mehrerer Luftkammern (Abb 6): Die Luft wird aus den zu entlüftenden Luftkammern gefördert und in die zu belüftenden Luftkammern gefördert. Hier findet keine Wechselwirkung mit der Umgebungsluft statt.

Die Steuerung der Luftzufuhr und -abfuhr erfolgt durch zwei 3/2-Wegeventile (3 Anschlüsse: Luftkammern, Pumpe, Umgebungsluft; 2 Stellungen: Aus/In Umgebung leiten, Aus/In Luftkammern leiten). Jede der Luftkammern soll separat befüll- und entleerbar sein und es soll möglich sein, das Volumen im Innern der Luftkammer konstant zu halten. Somit wird die Steuerung der In- und Deflation der Luftkammern von direktgesteuerten 3/3-Wegeventilen (3 Anschlüsse: Luftkammer, Zufluss, Abfluss; 3 Stellungen: Luft aus dem Zufluss in Luftkammer leiten, Luft in der Luftkammer halten, Luft aus der Luftkammer in Abfluss leiten) übernommen.

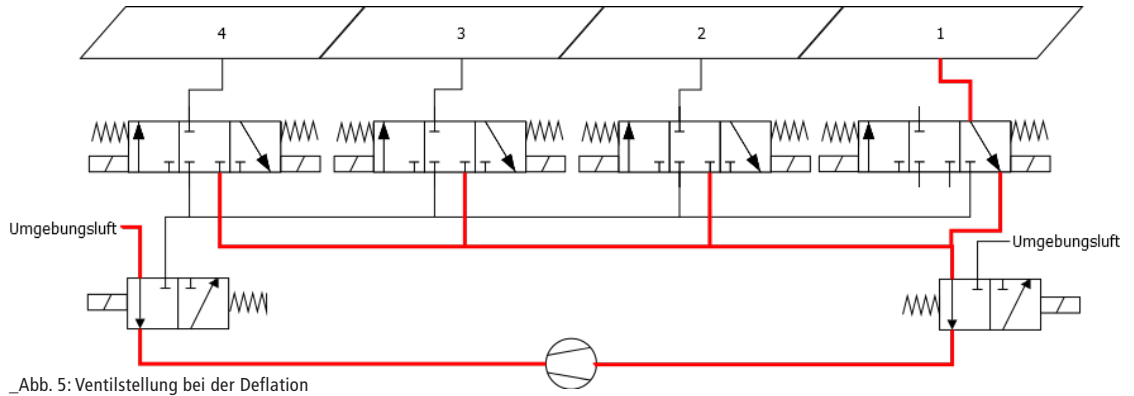
In Abb. 6 wird das Zusammenspiel der Komponenten anhand von vier Luftkammern exemplarisch verdeutlicht. Bei simultaner Deflation von Luftkammer 1 und Inflation von Luftkammer 2 (Fall 4) ist das Lufteinlassventil (rechts) so geschaltet, dass Luftkammer 1 mit der Abflussleitung und somit der Pumpe verbunden ist (linke Schaltstellung). Das Luftauslassventil (links) ist so geschaltet, dass die Pumpe mit der Zuflussleitung und somit Luftkammer 2 verbunden ist (rechte Schaltstellung).

Das 3/3-Wegeventil an Luftkammer 1 ist so geschaltet, dass Luftkammer 1 mit der Abflussleitung verbunden ist (rechte Schaltstellung). Das 3/3-Wegeventil an Luftkammer 2 ist so geschaltet, dass die Zuflussleitung mit der Luftkammer 2 verbunden ist (linke Schaltstellung). Alle weiteren 3/3-Wegeventile befinden sich in mittlerer Stellung und sind somit geschlossen. Die Luft strömt aus Luftkammer 1 durch die Pumpe in Luftkammer 2.

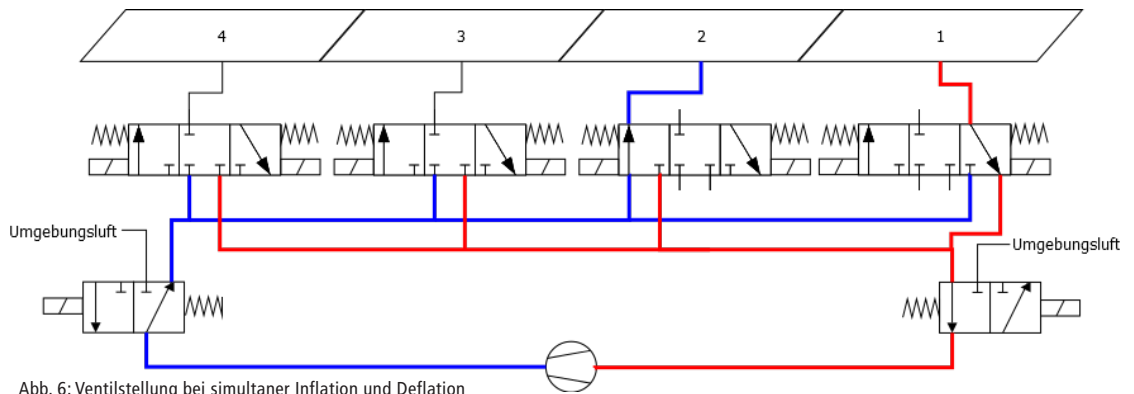
Ist bei Erreichen des gewünschten Drucks der Luftkammer 1 Luftkammer 2 noch nicht ausreichend gefüllt, das benötigte Luftvolumen zum Befüllen von Luftkammer 2 also größer



_Abb. 4: Ventilstellung bei der Inflation



_Abb. 5: Ventilstellung bei der Deflation



_Abb. 6: Ventilstellung bei simultaner Inflation und Deflation

ist, als Luft in Luftkammer 1 zur Verfügung steht, wird in den Fall 2 gewechselt und das restliche Luftvolumen für Luftkammer 2 aus der Umgebung gefördert. Während des gesamten Prozesses befindet sich das System immer in einem der 4 Fälle. Dabei kann der Wechsel zwischen den Fällen je nach gewünschtem Ergebnis durch pulsartiges Hin- und Herschalten rasch erfolgen.

Messung des Kompressionsdrucks

Da bei der Inflation einer Luftkammer B auch Druck auf die benachbarte Luftkammer A ausgeübt wird, steigt der Druck in dieser Luftkammer A an. Messungen haben einen treppenhaften Anstieg des Drucks in der distalen Luftkammer A bei der Inflation jeder weiteren Luftkammer ergeben, welcher nach der Inflation aller Luftkammern bis zu 80% über dem eingestellten Druck liegt [8]. Um diese Diskrepanz zu eliminieren, müssen zwei Begebenheiten sichergestellt werden. Erstens muss jederzeit die Möglichkeit vorhanden sein, die Luftkammern gesteuert zu entlüften und zweitens ist eine kontinuierliche Überwachung des Drucks der Luftkammern nötig, also die alleinige Messung des Drucks bei der Inflation ist unzureichend.

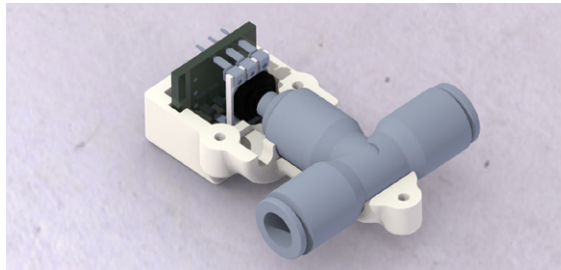
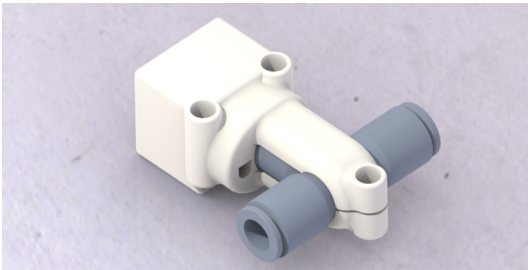
Nachdem zwei Verfahren, die auf unterschiedlichen physikalischen Effekten basieren, gegenübergestellt wurden, wurde sich wegen Nichtlinearitäten im Ein-/Ausgangverhalten von Force-Sensing Resistors gegen diese und für Luftdrucksensoren entschieden. Aufgrund der hohen Genauigkeit der Ausgabe im interessierenden Bereich, der geringeren Ausmaße und des vergleichbar niedrigen Preises fiel die Entscheidung der Ausführung auf einen Sensor, der den Druck relativ zum Atmosphärendruck genau im interessierenden Bereich misst. Dieser kommuniziert über den I2C Bus mit

dem Einplatinencomputer. Der I2C Bus hat gegenüber dem SPI Bus Vorteile bezüglich Störanfälligkeit und der Anzahl der anzuschließenden Leitungen. Um die ständige Überwachung des Drucks zu gewährleisten, ist für jede Luftkammer ein Sensor erforderlich. Bei den 12 Luftkammern der Manschette also insgesamt 12 Sensoren. Diese werden so platziert, dass sie sich möglichst nah an den Druckkammern befinden. Um den filigranen Sensor vor Umwelteinflüssen zu schützen wird ein Gehäuse konstruiert und im 3D-Druck-Verfahren hergestellt (Abb. 7 u. 8). Die Kopplung über eine standardisierte Rohr-Steckverbindung ermöglicht eine modulare Integration in das pneumatische System und somit den einfachen Austausch der Komponente.

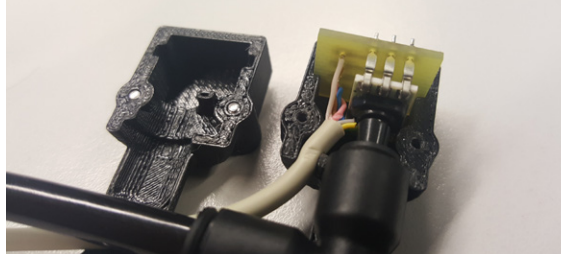
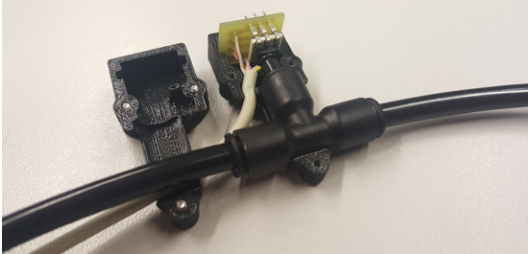
Steuerung und Messung

Die erstellte Hardware muss über einen Einplatinencomputer zentral gesteuert werden, um das Zusammenspiel der Komponenten zu ermöglichen. Die benutzende Person wählt das gewünschte Verhalten der Maschine über die Mensch-Maschine-Schnittstelle Touchscreen aus. Diese Informationen werden an den Einplatinencomputer Raspberry Pi übermittelt und dort verarbeitet. In Abhängigkeit der ausgewählten Parameter wird das Programm entsprechend angepasst ausgeführt. Während des Programmablaufs wird der Kompressionsdruck in den Luftkammern ständig überwacht und die Ventile werden entsprechend des gewünschten Druckprogramms und der Druckmessung geschaltet.

Die Schaltung der Ventile funktioniert verschieden für die unterschiedlichen Ventilarten. Die 3/2-Wegeventile werden über ein MOSFET gesteuert und so reicht hier



_Abb. 7: Bildsynthese (eng. Renderings) des Sensorgehäuses in CREO parametric



_Abb. 8: Fotos des Sensorgehäuses

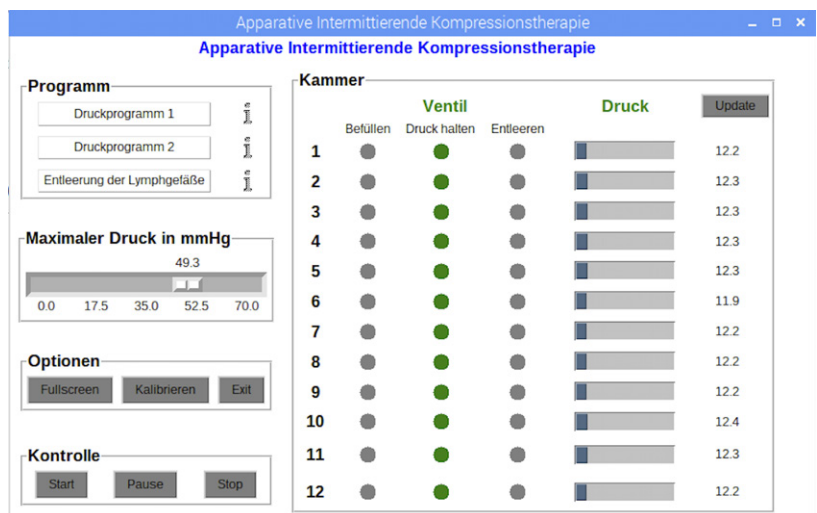
das einfache Anlegen eines HIGH-Pegels direkt am GPIO Pin des Einplatinencomputers, um das Ventil zu schalten. Da nicht ausreichend Pins zur direkten Steuerung der 3/3-Wegeventil-Blöcke zur Verfügung stehen, werden hierfür Expander genutzt, die über einen seriellen Bus angesprochen werden. Entsprechend der übermittelten Befehle wird am jeweiligen Ausgangspin des Expanders eine Spannung angelegt. Dieser Pin ist mit dem Eingang der Steuerkarte für die Ventilschaltung verbunden und schaltet das entsprechende Ventil des 3/3-Wegeventil-Blocks.

Die Messungen der Sensoren werden dem Einplatinencomputer zur Auswertung kommuniziert. Da der verwendete Sensor nur in einer Ausführung erhältlich ist, bei welcher die individuelle Einstellung der Adressen zur Kommunikation über den I2C-Bus nicht möglich ist, muss eine Selektionsschaltung (Multiplexer) verwendet werden. Dabei werden mehrerer Signale aufgenommen und zu einem Signal zur Übertragung über ein einziges Medium, in diesem Fall einen seriellen Bus, kombiniert.

Dies reduziert die erforderlichen Verbindungsleitungen und die Anzahl der benötigten Anschlüsse am Einplatinencomputer. Nach Übermittlung der Information an den Einplatinencomputer erfolgt die Umwandlung der Ausgabe in den Luftdruck entsprechend der Gebrauchsanweisung des Sensorherstellers.

Der allgemeine Ablauf der In- und Deflation der Luftkammern wird über vordefinierte Druckprogramme geregelt. In dieser Arbeit wurde eine geringe Anzahl an auswählbaren Druckprogrammen erstellt. Neben dem grundlegenden Ablauf ist der maximale Druck einstellbar. In Python wird der Ablauf der Druckprogramme als Matrize implementiert. Dabei entsprechen die Spalten den einzelnen Luftkammern und die Zeilen den Zeitschritten. Die Einträge bestehen aus den Zahlen -1 für drain, also Deflation, 0 für keep, also Druckhalten und 1 für fill, also Inflation. Zwei Ventilstellungen fill und drain sind immer durch ein keep getrennt. So wird verhindert, dass die Ventile eine undefinierte Position einnehmen.

Auch wird durch diese Maßnahme der maximale Strom reduziert, weil sich mehrere Spulen nie gleichzeitig in der Schaltphase befinden. Die Interaktion des Menschen mit der Maschine erfolgt über einen berührungsempfindlichen 7-Zoll-Bildschirm als Schnittstelle. Über die erstellte GUI (Abb. 9) kann das gewünschte Druckprogramm ausgewählt und der gewünschte maximale Kompressionsdruck in mmHg mit einem Schieberegler eingestellt werden. Auch die aktuelle Ventilstellung der 3/3-Wegeventile zu den Luftkammern und die doppelte Visualisierung des Kompressionsdrucks, einmal textuell und einmal als Balken, sind visualisiert.



_Abb. 9: Graphical user interface mit Tkinter

Evaluation

Abschließend wird das erstellte System mit den anfangs formulierten Anforderungen verglichen. Ein Großteil der Anforderungen, wie die geforderten Funktionen des pneumatischen Systems, konnten erfolgreich umgesetzt werden. Durch eine Erweiterung der Software könnten sämtliche Aspekte der Einstellbarkeit erreicht werden. Das erstellte physische System ist dafür ausgestattet. Druckprogramme wurden implementiert, allerdings in Anzahl und Umfang der Einstellungsmöglichkeiten reduziert. Die Wahl der Manschette und der Druckkammern entspricht nicht ausreichend den Vorgaben und so muss zukünftig diese Komponente entschieden verändert werden. Da der Fokus auf der Konstruktion eines ersten Funktionsmusters lag, wurden zur Reduktion des Arbeitsumfangs einige Anforderungen, gerade solche bezüglich der mobilen Nutzung und der Transportierbarkeit, nicht berücksichtigt.

Literatur

- [1] O. w. DocHealer, "Lymphedema staging for upper limbs", Nov. 2017. [Online] Verfügbar: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Upper_limb_lymphedema.jpg. Zuletzt aufgerufen am: 11.03.2019.
- [2] E. Petru, D. Fink, O. R. Köchli, and S. Loibl, Eds., *Praxisbuch Gynäkologische Onkologie*, 5th ed. Berlin: Springer, 2019.
- [3] H. Engel und G. Giessler, "Neue Therapieansätze beim Lymphödem", *Orthopädie-Technik*, pp. 44–48, https://ethianum-klinik-heidelberg.de/dokumente/upload/engel_giessler_orthopaedie_technik_11_2017.pdf, 2017.
- [4] B. Heinig und U. Wollina, "Komplexe physikalische Entstauungstherapie", *Hautarzt*, vol. 66, no. 11, pp. 810–818, 2015.
- [5] M. Földi, "Das Lymphödem: Grundlagen, Diagnostik und Therapie" [Online] Verfügbar: https://www.der-niedergelassene-arzt.de/fileadmin/user_upload/zeitschriften/vasomed/Artikel_PDF/2015/05-2015/Foeldi_CME.pdf. Zuletzt aufgerufen am: 11.03.2019.
- [6] C. Schwahn-Schreiber et al., "S1-Leitlinie Intermittierende Pneumatische Kompression (IPK, AIK)" (ger), *Der Hautarzt; Zeitschrift für Dermatologie, Venerologie, und verwandte Gebiete*, vol. 69, no. 8, pp. 662–673, 2018.
- [7] F. Selinger, "Konzepterstellung für ein portables System zur apparativen Kompressionstherapie" Bachelorarbeit, Institut für Automation und angewandte Informatik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2018.
- [8] P. Segers, J.-P. Belgrado, A. Leduc, and O. Leduc, "Excessive Pressure in Multichambered Cuffs Used for Sequential Compression Therapy", *Physical Therapy*, no. 82, pp. 1000–1008, <https://academic.oup.com/ptj/article/82/10/1000/2857675>, Oct. 2002.

Um den kostenaufwändigen Ausbau von Niederspannungsnetzen zu minimieren, existieren bereits einige Ansätze zur Lastflusssteuerung. Zu nennen sind regelbare Ortsnetztransformatoren, sowie Spannungs- und Wirkleistungsregler, welche sich bereits im Testeinsatz befinden. Gegenüber diesen besteht aber auch die Möglichkeit sich die Topologien von Niederspannungsnetzen zu Nutze zu machen. Durch gezieltes Koppeln von Teilnetzen mittels NH-Sicherungen oder kurzen Leitungsstücken können in einigen Fällen Qualitätsprobleme der Spannung behoben werden, bzw. der Netzausbau verzögert werden.

Prix d'excellence 2019

ANWENDUNGSFÄLLE ZUR KOPPLUNG VON NIEDERSPANNUNGSNETZEN_

Max Hamilius

Einleitung

Der stetige Zuwachs an erneuerbaren Energiequellen, sowie der steigende Anteil an Elektromobilität, stellen eine besondere Herausforderung an elektrische Energieübertragungsnetze. In ungünstigen Fällen kann dies zu ungleichmäßiger Belastung, sowie zu Überlastungen der Betriebsmittel führen. Da Photovoltaikanlagen sowie Elektrofahrzeuge vorwiegend an das Niederspannungsnetz angeschlossen werden, ist besonders diese Netzebene von großer Bedeutung.

In klassisch radial-verlegten Niederspannungsnetzen gibt es bereits neben dem Netzausbau mehrere wirtschaftliche Maßnahmen die Lastflüsse kontrollieren zu können. Hierzu zählen die Blindleistungsregelung, Spannungsregelung und regelbare Ortsnetztransformatoren. Bei einer festgelegten Netztopologie können Spannungsgrenzverletzungen, als auch die thermische Überlastung der Betriebsmittel nicht immer verhindert werden.

Im schlimmsten Fall führt dies zu Abschaltungen von PV-Anlagen, sowie zu Schutzauslösungen im Netz. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken ist die Kopplung von Teilnetzen eines Niederspannungsnetzes. Die Steigerung der Aufnahmekapazität erneuerbarer Energiequellen, sowie der Elektromobilität, die Verteilung der Lastflüsse, die Steigerung der Versorgungszuverlässigkeit, sowie die Minimierung der thermischen Verluste können hier als vorteilhafte Argumente genannt werden.

Die Vermaschung von Niederspannungsnetzen kann in einzelnen Fällen eine kostengünstige Alternative zum konventionellen Netzausbau oder dem Einsatz zusätzlicher Betriebsmittel bieten. Durch das Verbinden einzelner Teilnetze eines mehrstranggespeisten Netzes kann die Lastaufnahme dessen gesteigert werden, das zunehmende Potenzial von Erzeugungsanlagen aufgenommen und eine Minimierung der Unsymmetrien der Außenleiterspannungen erreicht werden, ohne die in der Norm vorgegebenen Grenzen zu überschreiten.

Ziel der Arbeit war es daher einzelne Anwendungsfälle zur Netzkopplung aufzusuchen und diese im Hinblick verschiedener Szenarien zu analysieren. Anhand realer Netzdaten und daraus hergeleiteten Charakteristiken, sowie ausgewählter Bewertungsfaktoren konnte dann ein gegebenes reales Netz mittels Lastflussrechnung auf Anwendbarkeit eines gekoppelten Betriebes überprüft werden. Hierbei wurden die in der Netzplanung

verwendeten Regeln und Kriterien stets als Voraussetzung und Berechnungsvorschrift angesehen.

Methodik

Aufgrund der Komplexität von Niederspannungsnetztopologien wurden mittels eines eigens hierfür erstellen Verfahrens reale Netzdaten verarbeitet und analysiert. Auf diese Weise konnten charakteristische Merkmale erfasst werden und spezifischen Anwendungsfällen zugeordnet werden. Auf Basis der Netzeigenschaften von Last und Einspeisung wurden Szenarien gebildet, die anschließend zur Simulation der Auswirkungen herangezogen wurden.

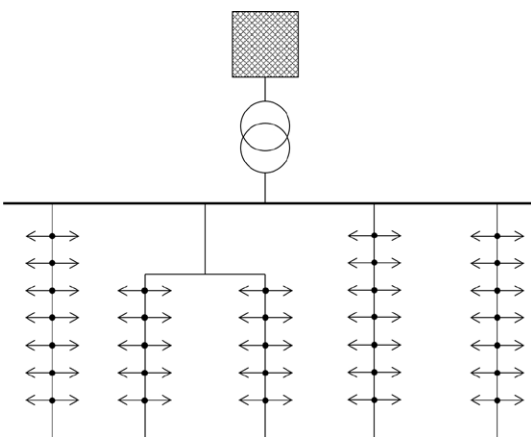
Da keine Echtzeitdaten von PV-Anlagen und Lasten der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Netzmodelle vorliegen, mussten Last- und Einspeiseprofile anhand von Geoinformations- und Klimadaten, sowie Nutzungsprofilen der Netzkunden hergeleitet werden. Hierbei wurden die Netze und deren untergelagerten Teilnetze nach Siedlungstypen gegliedert, welches das Festlegen der für die Lastflussrechnung benötigten Werte für Lasten und Einspeisungen ermöglichte. Im Hinblick auf eine Grenzwertanalyse waren hierbei besonders Worst-Case-Szenarien von großer Bedeutung.

Netztopologien und -Formen

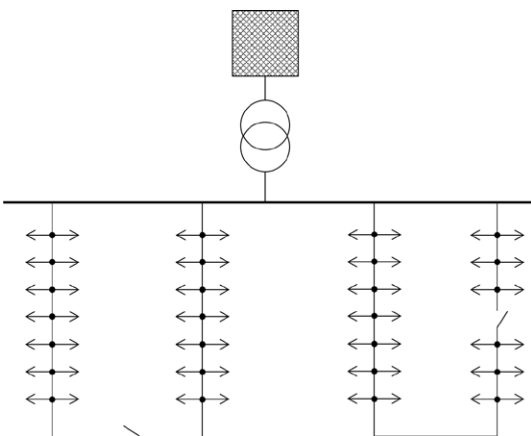
In Niederspannungsnetzen unterscheidet man allgemein zwei Grundformen: Inselnetze und Maschennetze. Inselnetze kann man weiter unterteilen in Strahlenetze (Abb. 1), wie Stichnetze und Ausläufernetze, sowie Ringnetze (Abb. 2) und vermaschte Netze. Häufig sind auch Mischformen vorzufinden, da oft wegen den lokalen geografischen Begebenheiten nicht alle Schaltzustände erreicht werden können (z.B. Ringschluss an Ausläufern).

Niederspannungsnetze werden heute wegen der einfachen und übersichtlichen Betriebsweise weitgehend als Strahlenetze (bzw. als offene Ringnetze) betrieben, wobei jede Ortsnetzstation ihr eigenes Versorgungsgebiet hat.

Koppelt man zwei Insel- oder Maschennetze, so entsteht ein geschlossener Ring. Dies entspricht der im Rahmen dieser Arbeit gewünschten Betriebsweise, da diese die Vorteile von Maschennetzen bietet: Versorgungssicherheit, Spannungshaltung und Lastausgleich sind im Maschennetz dank der Speisung der Netzknoten von mehreren Seiten günstiger, besonders dort, wo zahlreiche Abnehmer unterschiedlicher Leistung und mit unterschiedlichen Belastungsarten vorhanden sind.



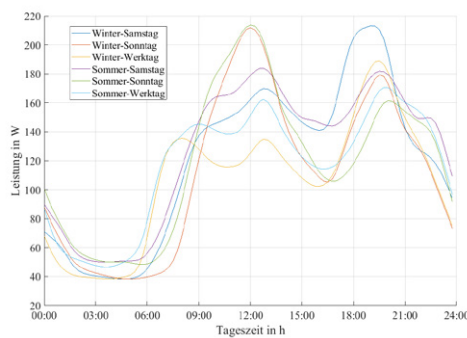
_Abb. 1: Strahlennetze



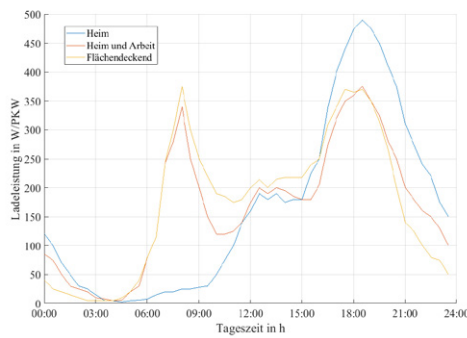
_Abb. 2: Ringnetze

Analyse der Niederspannungsnetze

Eine kategorische Netzanalyse ist ein ungeeigneter Ansatz, da die Eigenschaften ähnlicher Netztopologien stark variieren. Hierbei gilt es die Teillasten und Einspeiseleistungen gewählter Netzabschnitte in Abhängigkeit verschiedener Szenarien einschätzen zu können. Dazu mussten u.a. repräsentative Siedlungstypen, sowie spezifische Lastprofile (Abb. 3 + 4) herangezogen und untersucht werden.



_Abb. 3: Normierte Haushaltslastprofile (VDEW)



_Abb. 4: Durchschnittlicher Lastgang durch Ladevorgänge von E-Fahrzeugen (VDE)

Erstellung der Anwendungsfälle

Die Erstellung und Zuordnung der Anwendungsfälle erfolgte anhand von Bewertungsfaktoren, welche eine einheitliche Betrachtung der Netzeigenschaften ermöglichte. Anhand dieser Faktoren konnten in einem ersten Schritt die Ist-Zustände der Netze ermittelt werden und, in einem zweiten Schritt, diese je nach Szenario und Anwendungsfall verändert werden. Lag im aktuellen Zustand bereits ein kritischer Betriebszustand vor, so wurde eine Kopplung an einer geeigneten Stelle im Netz vorgenommen und erneut der Zustand mittels Lastflussrechnungen überprüft. Zudem konnten auf diese Weise zeitnahe Prognosen der Netzzustände erstellt werden.

Folgende Bewertungsfaktoren wurden herangezogen:

- _Flächenbezogene Lastdichte (W/m²)
- _Einspeisung-zu-Last-Verhältnis
- _Auslastung der Ortsnetztransformatoren (% S_{r,T})

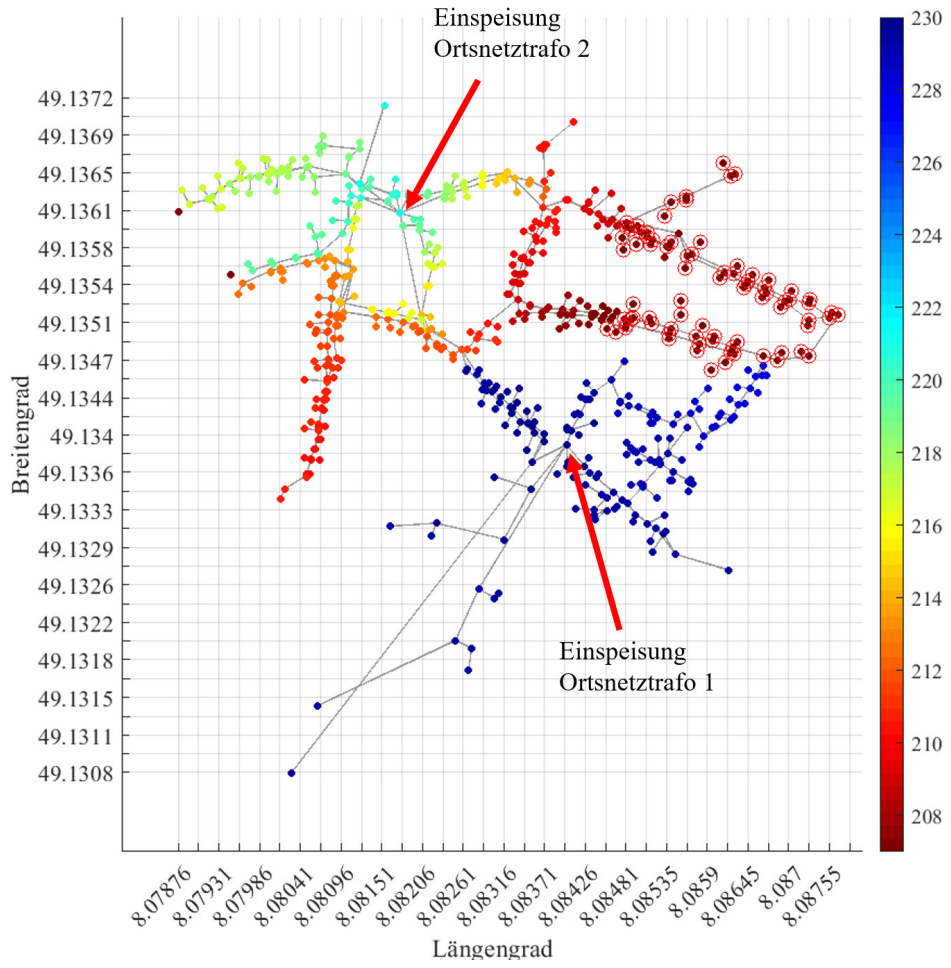


Abb. 5: Starklastfall NS-Netz Ingenheim, RP (ohne Kopplung)

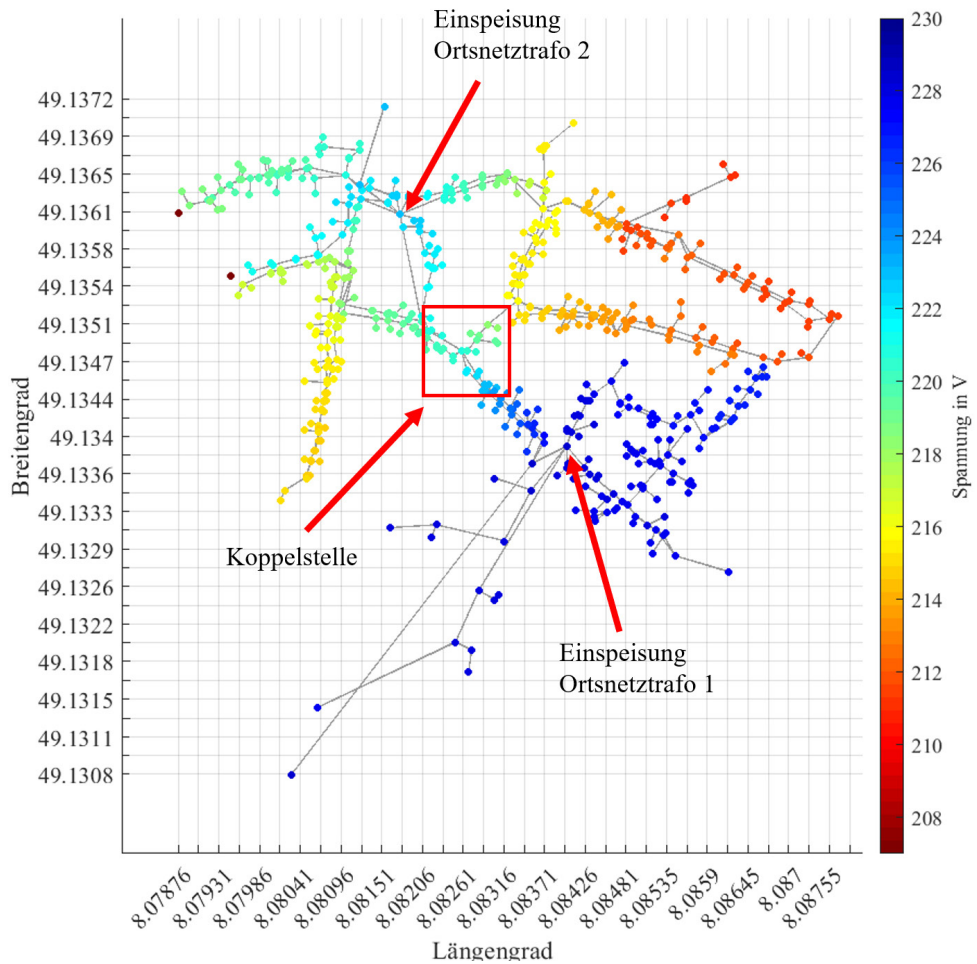


Abb. 6: Starklastfall NS-Netz Ingenheim, RP (mit Kopplung)

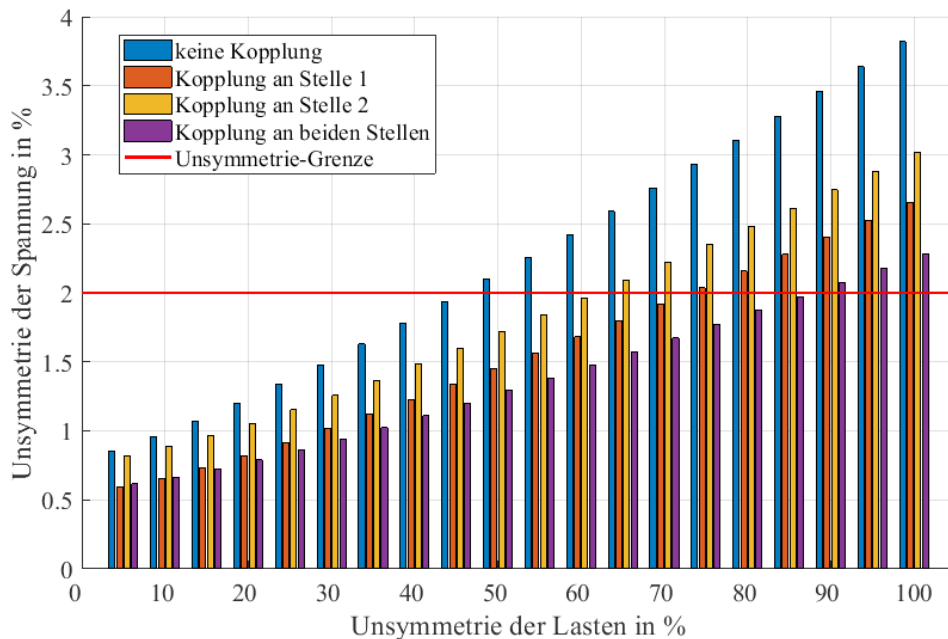


Abb. 7: Unsymmetriefaktoren in Abhängigkeit der Verteilung an Referenzlasten für Teilnetz 2 (Ingenheim, RP)

Anhand dieser Bewertungsfaktoren ergaben sich folgende drei Anwendungsfälle:

- _Optimierung der Lastverteilung
- _Aufnahme hoher lokaler PV-Einspeisung
- _Ausgleichen von Unsymmetrien der Außenleiterbelastungen

Validierung der Anwendungsfälle

Die mittels PSS@SINCAL durchgeführten Lastflussrechnungen (LFR) gaben Auskunft über Spannungswinkel und -betrag jedes Netzknotens, insofern die LFR für das gegebene Lastszenario konvergierte. Da ein Netzbetreiber ohne zusätzliche Hilfsmittel keinen dynamischen Eingriff in die Spannungshaltung im Niederspannungsnetz hat, konnten Spannungsbandverletzungen direkt als kritischen Zustand angenommen werden. Nach den Spannungsqualitätsmerkmalen (DIN EN 50160) ergeben sich für Niederspannungsnetze in Deutschland bei einer Nennspannung U_n von 230V folgende Grenzwerte der Außenleiterspannungen:

$$207V < U_i < 253V \quad i \in \{1,2,3\}$$

Im Falle hoher Einspeisung gelten weiter die Vorgaben der VDE-AR-N 4105 (maximale Spannungsänderung durch Erzeugungsanlagen von 2% U_n). Zu beachten gilt, dass sich die Wechselrichter von Erzeugungsanlagen bei einer Spannung von 109% U_n bereits vom Netz trennen.

Spannungsverhalten

In Starklastfällen ist es im aktuellen Schaltzustand des Beispielnetzes von Ingenheim, Rheinland-Pfalz zu Spannungsgrenzverletzungen gekommen (Abb. 5: eingekreiste Netzknoten). Abhilfe hat hier eine starre Kopplung mittels NH-Sicherungen geschaffen (Abb. 6).

Spannungssymmetrie

Zur Betrachtung der Auswirkungen von verschiedenen Koppelzuständen auf unsymmetrische Lastverteilungen, wurden jeweils Lastflussrechnungen durchgeführt. Weiter wurde nach vier möglichen Koppelszenarien unterschieden. In Abbildung 7 sind die Unsymmetrien der Außenleiterspannungen nach Gleichung 1 in Abhängigkeit der Verteilung an Referenzlasten auf die Außenleiter für ein Teilnetz von Ingenheim, RP dargestellt.

$$k_u = \frac{U_2}{U_1}$$

k_u : Unsymmetriefaktor

U_1 : Mitsystemspannung

U_2 : Gegensystemspannung

Die Ergebnisse für das gegebene Netz zeigten ein erhöhtes Aufnahmepotenzial unsymmetrischer Lasten bei zunehmendem Kopplungsgrad. Eine Überschreitung der zulässigen Grenze von 2% an Unsymmetrie konnte so weiter verzögert werden.

In der Ergebnisbetrachtung wurden die nach der DIN EN 50160 festgelegten Spannungsqualitätsmerkmale für die unterschiedlichen Schaltzustände untereinander verglichen. Hierbei wurden in allen Fällen Verbesserungen für die Mehrheit der Netzknoten festgestellt, als auch Verschlechterungen an einigen wenigen Netzknoten.

Für die erstellten Anwendungsfälle haben die Ergebnisse gezeigt, dass eine Kopplung mittels NH-Sicherungen oder kurzen Leitungstücken, eine kostengünstige aber kurzfristige Lösung gegenüber dem klassischen Netzausbau bietet. Da jedoch die Auswirkungen stark vom Ort der Kopplung abhängig sind, kann keine allgemeine Aussage über die Platzierung von Netzkopplungen getroffen werden. Aus diesem Grund ist eine gesonderte Betrachtung der optimalen Koppelstelle(n) nach dem erstellten Verfahren für andere Netze erforderlich.

Carbon-Fibre Reinforced Polymers (CFRPs) are composites used in advanced engineering applications and commonly subject to cyclic loading. CFRPs develop damage through the accumulation and clustering of fibre-breaks, which can eventually trigger catastrophic failure. This article outlines the first model in literature able to quantify damage accumulation in CFRPs under cyclic loading conditions by predicting the kinetics of fibre-breakage.

Prix d'excellence 2019

PREDICTING DAMAGE ACCUMULATION IN CARBON-FIBRE COMPOSITES UNDER CYCLIC LOADING_

Alex Mersch



_Fig. 1: Failed pressure vessel made of CFRP composites

© Wroclaw University of Science and Technology

Carbon-Fibre Reinforced Polymers (CFRPs) are composites consisting of a polymer matrix reinforced by carbon fibres, which provide the strength of the composite material. The polymer matrix is usually a thermoset resin, such as epoxy, binding the carbon fibre reinforcements together and enabling the transfer of shear-stresses between the fibres. Due to their high rigidity and strength-to-weight ratio, CFRPs are used in advanced engineering applications, such as aerospace, automotive and sports equipment. CFRP components are often exposed to vibrations and other cyclic loads. Their behaviour under these loading conditions is a complex physical phenomenon, which creates enormous challenges for the design and maintenance of CFRP components.

Experimental work has shown that the load-carrying ability of CFRPs is reduced with an increased number of loading cycles. At the micromechanical level, it is widely accepted that CFRPs accumulate damage through progressive clustering of broken fibres, hereafter called broken clusters. Damage accumulation is initiated through breakage of weaker carbon fibre segments, leading to cracks in the polymer matrix. The matrix cracks grow longitudinally along the carbon fibres, which results in the debonding of the fibres from the polymer matrix and lower ability to transfer shear stresses near the matrix cracks. This generates stress concentrations in the neighbouring fibres and can cause failure of the latter. New matrix cracks are initiated

and a larger broken cluster is formed progressively. The damage accumulation process can become unstable once a broken cluster reaches a critical size and failure of the entire specimen is triggered, as shown in Figure 1.

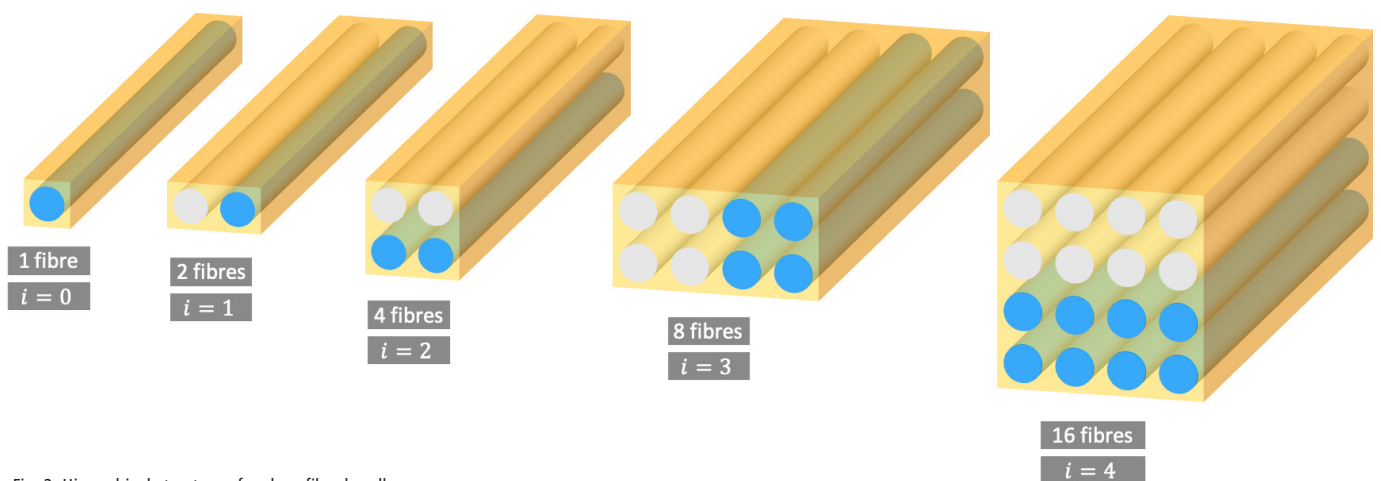
The challenge to avoid failure of CFRP components under cyclic loading conditions is generally addressed by introducing large safety factors and extensive experimental campaigns, partially due to a lack of effective and efficient models to predict the accumulation of micromechanical damage with progressive cyclic loading and its effect on macroscopic properties.

At the moment, there are no models in literature able to predict damage accumulation through clustering of fibre-breaks under cyclic loading. This lack of models can be justified by two factors: Firstly, even under static loading conditions, this is already a very challenging phenomenon to model; secondly, most existing static models are too computationally demanding to be applicable to cyclic loading conditions.

However, this gap could be bridged by extending two analytical models previously developed by the Composites group in the Mechanical Engineering department at Imperial College London. The latter two models are based on a hierarchical scaling law derived from a statistical analysis of the failure process of carbon fibre bundles. It has already been demonstrated that this approach allows not only to assess clustering of fibre-breaks under static loading conditions, but also to estimate the expected lifetime of CFRP components under cyclic loading conditions. Predictions of the two existing models have been extensively validated against experimental results, with blind predictions achieving excellent correlation with independently obtained experiments. Based on these promising results, a new model making use the hierarchical scaling law was developed to quantify damage accumulation through clustering of fibre-breaks under cyclic loading.

To illustrate the underlying mechanisms of the new model, the main assumptions of the hierarchical scaling law and the parameters used to assess damage accumulation under cyclic loading conditions are elaborated below:

_CFRP components are modelled as hierarchical carbon fibre bundles within a polymer matrix. Hierarchical means that bundles have a certain level and are composed of two lower-level bundles, which can themselves be



_Fig. 2: Hierarchical structure of carbon-fibre bundles

divided into lower-level bundles. The smallest building block of a hierarchical bundle is an individual carbon fibre (level-[0] bundle). Pairing two individual carbon fibres generates a level-[1] bundle, which can then be paired together with another level-[1] bundle to get a level-[2] bundle made of 4 individual carbon fibres. This process can be repeated until bundles made of hundred millions of carbon fibres are modelled. The hierarchical structure of the bundles is outlined in Figure 2.

_A carbon fibre can only survive a certain loading cycle if the weakest element of this fibre is not breaking under the applied load. Knowing that the strength of a fibre element follows a so-called Weibull distribution, the survival probability of an individual carbon fibre at a given load and number of cycles can be calculated.

_Consider a level-[1] bundle composed of two level-[0] individual carbon fibres under a certain applied load. There are 3 scenarios that may occur:

- _The whole bundle survives with both fibres undamaged.
- _The bundle fails after both fibres break.
- _The bundle survives with one broken fibre, while the other fibre survives the stress concentration.

In the 3rd scenario, a matrix crack forms and propagates along the fibres during the subsequent loading cycles. This creates further stress concentrations in the

neighbouring fibre and potentially leads to failure of weaker fibre elements. If the neighbouring fibre breaks under the new stress concentration, the whole level-[1] bundle can be considered failed. By taking the 3 scenarios above into account, a hierarchical scaling law to predict the survival probability of a level-[1] bundle can be derived based on the survival probabilities of a level-[0] bundle (individual carbon fibre) under uniform loading and under stress concentration.

The analysis done so far focuses on a level-[1] bundle composed of two level-[0] sub-bundles. The next step consists in extrapolating the survival probabilities to any bundle of a generic level-[i+1] composed of two level-[i] sub-bundles. Therefore, the failure surfaces of CFRP components had to be investigated at different lengthscales. Experimental studies have shown that individual carbon fibres are pulled out from small bundles, which are themselves pulled out from larger bundles.

The aspect ratios of these features are very similar, regardless of the lengthscales. This suggests that there is some degree of self-similarity in the failure process of CFRP components. The survival probabilities of any level-[i+1] bundle can be easily determined by referring to the survival probabilities of the corresponding level-[i] sub-bundles.

Thus, the survival probability of bundles consisting of millions of fibres can be calculated recursively based on the survival probability of an individual carbon fibre. This analytical

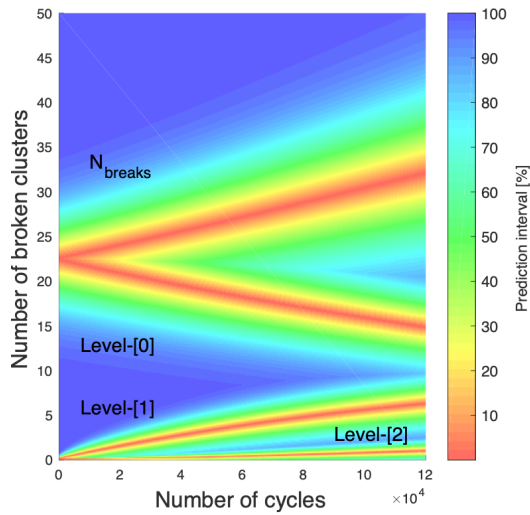


Fig. 3: Evolution of the number of broken clusters and total number of fibre-breaks N_{breaks} at an intermediate loading level

algorithm is highly efficient and allows calculate survival probabilities of large bundles at any loading cycle within less than 60 seconds.

In order to assess damage accumulation in CFRP components, the progressive clustering of fibre-breaks needs to be quantified. The expected number of broken clusters ranging from level-[0] to level-[i] in a level-[i+1] bundle can be linked to the survival probabilities of the corresponding sub-bundles. Furthermore, it can be shown that the number of level-[i] broken clusters is expected to follow a binomial distribution. Assuming that the overall bundle is much larger than any broken cluster, this binomial distribution can be approximated by a normal distribution. In a next step, the total number of fibre-breaks in the bundle can be derived based on the number of broken clusters. The total number of fibre-breaks is a linear combination of normally distributed random variables and thus also follows a normal distribution.

Based on survival probabilities, an expression for the largest broken cluster in a given bundle can be derived. This is another important parameter in the assessment of damage accumulation, as it allows to find the critical broken cluster size, which triggers failure of CFRP components if it is formed.

After having outlined the roadmap on how to quantify damage accumulation under cyclic loading conditions, the results obtained from the new model will be analysed and discussed:

Evolution of the number of broken clusters and total number of fibre-breaks under cyclic loading

Figure 3 shows the evolution of the number of broken clusters of different levels and the total number of fibre-breaks in a small CFRP specimen (~103 carbon fibres) at an intermediate loading level. Prediction intervals showing the statistical distribution around mean values are plotted for each broken cluster level. For instance, the most reddish band shows what the mean number of broken clusters of a given level is expected to be based on the model.

For intermediate loading levels, the 1st loading cycle leads only to individual fibre-breaks (level-[0] clusters), while the expected number of higher-level clusters stays 0. Throughout the cyclic loading process, the total number of fibre-breaks increases as carbon fibres keep breaking progressively under stress concentration resulting from the matrix crack propagation. Due to the emergence of these

new fibre-breaks, level-[0] broken clusters transform into level-[1] broken clusters. Consequently, the number of level-[0] broken clusters decreases while the number of level-[1] broken clusters increases. 1-2 level-[2] clusters are also expected to occur during the first 105 loading cycles.

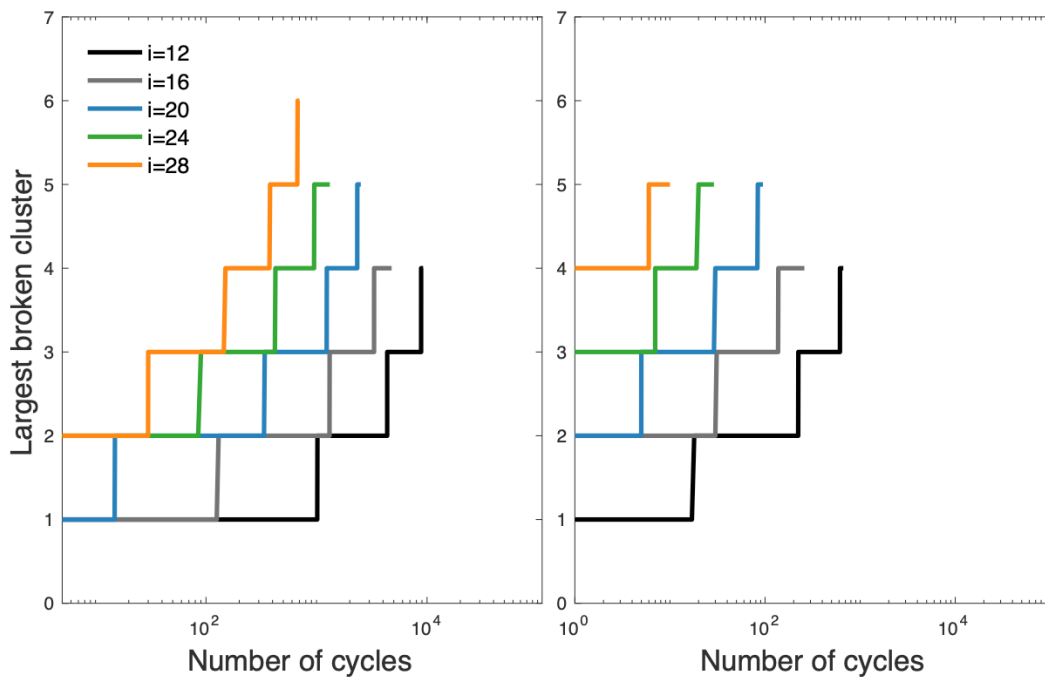
It can further be noted that there is high variability in the number of broken clusters and total number of fibre-breaks. For example, the 90% prediction interval for the total number of fibre-breaks ranges from less than 20 to more than 40 individual fibre-breaks, while the expected mean value is around 30 fibre-breaks.

The model accurately matches experimental measurements at 105 loading cycles and intermediate loading levels. The colourmap confirms that all experimental data points are within the 90% prediction interval of the corresponding broken cluster and total fibre-breaks distribution. At high loading levels the model is slightly less accurate and underpredicts the number of high-level broken clusters in favour of individual fibre-breaks.

Evolution of the largest broken clusters under cyclic loading

The evolution of the largest cluster under cyclic loading was investigated for bundle levels between [12] and [28] as shown in Figure 4. The number of carbon fibres in these bundles ranges from 103 to 108. At intermediate loading levels the largest broken cluster was either level-[1] or level-[2] after the first loading cycle. Apart from one exception all the bundles failed with a largest cluster of level-[4] or level-[5], which corresponds to clusters of 16-31 and 32-63 fibre-breaks, respectively. Only the level-[28] bundle failed after a level-[6] broken cluster with 64-127 fibre-breaks occurred. Higher loading levels do not only lead to shorter bundle lifes, but also to considerably larger broken clusters after the 1st loading cycle. However, none of the bundles contained a level-[6] broken cluster at failure, not even the level-[28] bundle. This indicates that higher loads do not necessarily result in larger broken clusters at failure.

The model shows evidence that a critical broken cluster size triggers failure of CFRP components under cyclic loading. Bundles with 103 to 108 fibres tend to fail after a critical broken cluster of 16-127 fibre-breaks has formed. This proves that CFRP components can



_Fig. 4: Evolution of the largest broken cluster at an intermediate (left) and high (right) loading level

withstand larger broken clusters under cyclic loading compared to static loading, as previous studies predicted a critical static broken cluster size of only 8-32 fibre-breaks for the same range of bundle levels. A further difference to static loading conditions is that the largest broken clusters do not necessarily occur under the highest applied loads. While large bundles can contain broken clusters of 127 fibre-breaks at failure under an intermediate loading level, they fail with only 32-63 fibre-breaks at higher loading levels. Furthermore, the model also implies that the critical broken cluster size tends to increase progressively with bundle level.

A parametric study was conducted with varying material properties for the carbon fibres and polymer matrix. The study showed that none of the material properties led to excessively large broken clusters at failure. The critical broken cluster size is thus not overly sensitive to material properties, suggesting that the predicted size is valid for a wide range of CFRP types.

In conclusion, this is the first model in literature able to quantify the kinetics of fibre-breakage and damage accumulation under cyclic loading. The recursive nature of the model allows to predict damage accumulation in CFRP components with virtually any number of fibres and for their entire lifetime in less than 60 seconds. Moreover, model predictions for the accumulation and clustering of fibre-breaks under cyclic loading were successfully validated against experimental results from literature.

Due to its computational efficiency and easy-to-use analytical implementation, the model is expected to have the following applications:

- _Guiding the development of CFRP components with a longer lifetime under cyclic loading by predicting the effects that different carbon fibre and matrix properties would have on the accumulation of damage;
- _Defining acceptable levels of micromechanical damage in CFRP components under cyclic loading;
- _Developing macro-scale health-monitoring strategies for CFRP components under cyclic loading.

For more information

Pimenta S., Mersch A., Alves M., (2018), Predicting damage accumulation and fatigue life of UD composites under longitudinal tension, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 388, 012007

Prix d'excellence 2019

ENTWICKLUNG EINES HOCHLEISTUNGSFÜGEVERFAHRENS DURCH KOMBINATION EINES UNTERPULVER- UND PLASMASCHWEISSVERFAHRENS_

Michel Reisch

Schweißen stellt ein bedeutendes Fertigungsverfahren mit signifikanten Investitionskosten und hohem Personalaufwand in zahlreichen Industriezweigen dar. Kontinuierliche Forschung und Weiterentwicklungen haben zum Ziel die Qualität der Schweißungen zu steigern und gleichzeitig die Fertigungskosten zu verringern [Man98]. Unterpulver(UP)-, Metall-Schutzgas(MSG)-, Elektronenstrahl- und Laserstrahlschweißen werden aufgrund ihres hohen Mechanisierungsgrads in Zukunft Grundlage für innovative Weiterentwicklungen sein.

Im Schiffbau werden traditionell sehr große und lange Bleche mit einer hohen Dicke verschweißt. Zudem erhöhte sich bereits frühzeitig die Anzahl an Schweißnähten in Schiffen beispielsweise durch die Einfuhr der Pflicht von doppelwandigen Schiffsrümpfen. In der Produktion von Schiffen stellt Schweißen zudem eines der Hauptkostenfaktoren dar. So hat sich in der maritimen Fertigung das Unterpulverschweißen als Hochleistungsprozess durchgesetzt.

Im Hinblick auf den erhöhten Kostendruck in der Stahlindustrie, insbesondere in Hochlohnländern, steigt das Interesse an einer kostengünstigen Performancesteigerung von etablierten Schweißverfahren, wie dem UP-Verfahren, an. Synergieeffekte aus der Kombination verschiedener Prozesse miteinander können die Wirtschaftlichkeit von etablierten Schweißverfahren steigern. Die Kombination von verschiedenen Schweißverfahren ermöglichen es die Fertigungszeit zu verringern und neue Anwendungsgebiete zu finden. Hierbei bieten sich insbesondere Verfahren an, die bereits im jeweiligen Betrieb eingesetzt werden.

Das am ISF der RWTH Aachen entwickelte Laser-UP-Hybrid Schweißen stellt eine mögliche Verfahrenskombination zur Leistungssteigerung des UP-Prozesses dar. Die beträchtlichen Kosten einer Laserschweißanlage und die verfahrensbedingten hohen Anforderungen an die Spaltmaßgenauigkeit schränken die Anwendbarkeit dieses Verfahrens allerdings stark ein [Rei14; ROJ14]. Der finanzielle Aspekt stellt derzeit das größte Hemmnis für klein- und mittelständische Unternehmen dar, dieses Verfahren einzusetzen.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die Möglichkeit einer kostengünstigen Performancesteigerung des etablierten UP-Eindraht-Schweißprozesses durch Kombination des UP- mit einem vorlaufenden Plasmaschweißverfahren untersucht werden. In einem ersten Schritt soll hierzu eine

Optimierung der Anlagentechnik durchgeführt werden. Insbesondere die Pulverschütte des UP-Prozesses muss für den hybriden Prozess modifiziert werden, um den Abstand der Schweißprozesse zueinander so gering wie möglich zu halten. Zusätzlich muss eine geeignete Badsicherung implementiert werden. Nach der Validierung eines UP-Referenzparametersatzes aus der Industrie wird in einem ersten Schritt die serielle Kopplung der beiden Verfahren untersucht. In diesem Fall arbeiten der UP- und der Plasmaprozess in einem definierten Abstand zueinander in zwei getrennten Schmelzbädern. In einem zweiten Schritt wird der Einsatz eines hybriden Prozesses untersucht. Beide Verfahren sollen in einer gemeinsamen Prozesszone arbeiten, sodass sich ein gemeinsames Schmelzbad ergibt.

Anschließend werden in einem Benchmark die reinen UP-Schweißungen mit den Schweißungen der seriellen und hybriden Kopplung gegenübergestellt, um eine mögliche Wirtschaftlichkeitssteigerung des UP-Eindrahtverfahrens durch Plasmaunterstützung zu überprüfen. Die Güte der Verbindungsschweißungen wird durch Untersuchung von Schliffbildern, Ermittlung von Härteverläufen und der chemischen Zusammensetzung bestimmt.

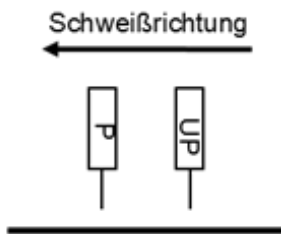
Optimierung der Anlagentechnik

Für die geplanten seriellen und hybriden Schweißversuche muss zum einen eine geeignete Schweißbadsicherung ermittelt werden und zum anderen muss eine neue Pulverschütte entwickelt werden, da es mit der bestehenden Pulverschütte nicht möglich ist, die Prozesse ausreichend nah aneinander zu bringen, dass ein gemeinsames Schmelzbad entsteht.

Ermittlung einer geeigneten Badsicherung

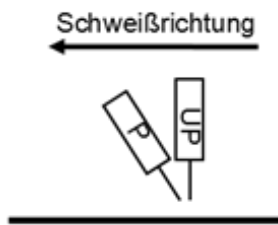
Für die geplanten Verbindungsschweißungen ist es notwendig, das Schmelzbad gegen Herausfallen zu sichern. Die Badsicherung muss ebenfalls eine effiziente Abschirmung der Wurzel vor den schädlichen Einflüssen der Atmosphäre sicherstellen. Eine Kupferschiene mit Pulverkissen erfüllt die genannten Anforderungen und stellt ein in der Industrie übliches Badsicherungsverfahren dar. Zu diesem Zweck wurde in eine Kupferschiene von 400mm Länge und 30mm Breite eine 15mm breite und 5mm tiefe Nut zur Aufnahme des Badsicherungspulvers gefräst.

Für die Schweißversuche wurde die Nut der Badsicherung mit dem gleichen Pulver befüllt, das auch für den



Serielle Prozesskopplung

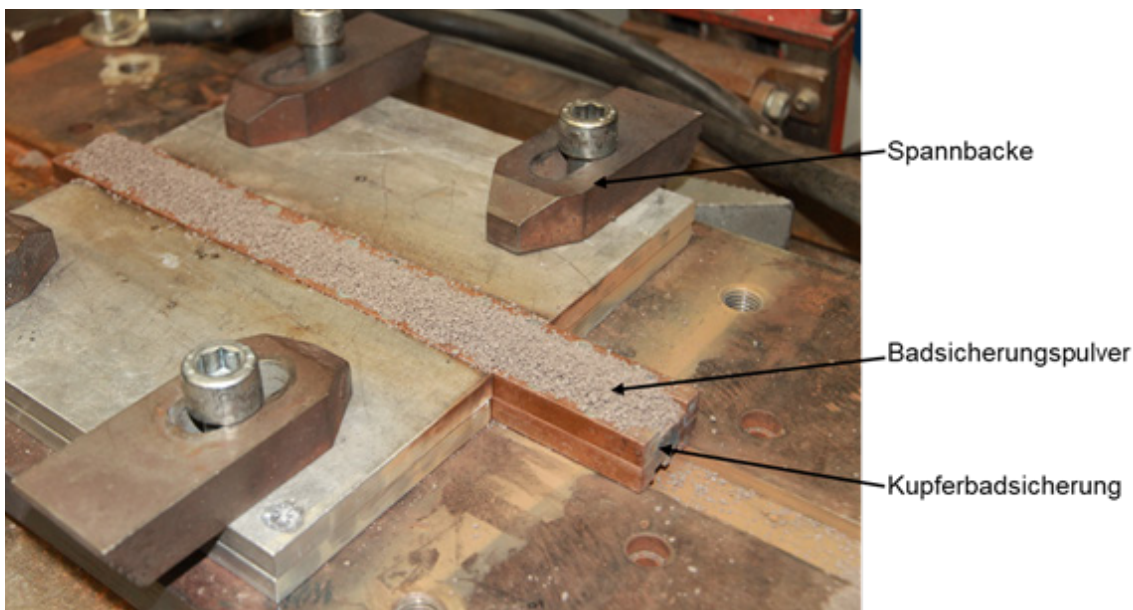
➔ zwei getrennte Schmelzbäder



Hybride Prozesskopplung

➔ ein gemeinsames Schmelzbad

_Abb. 1: Prinzipdarstellung der seriellen und hybriden Prozesskopplung



_Abb. 2: Kupferbadsicherung mit Spannvorrichtung

Unterpulverprozess verwendet wird. Anschließend wurde die Schweißprobe mit dem Schweißspalt exakt auf dem Pulverkissen ausgerichtet und mit Hilfe von Spannbacken festgespannt. In Abbildung 2 sind die mit Pulver befüllte Badsicherung und die Spannvorrichtung dargestellt.

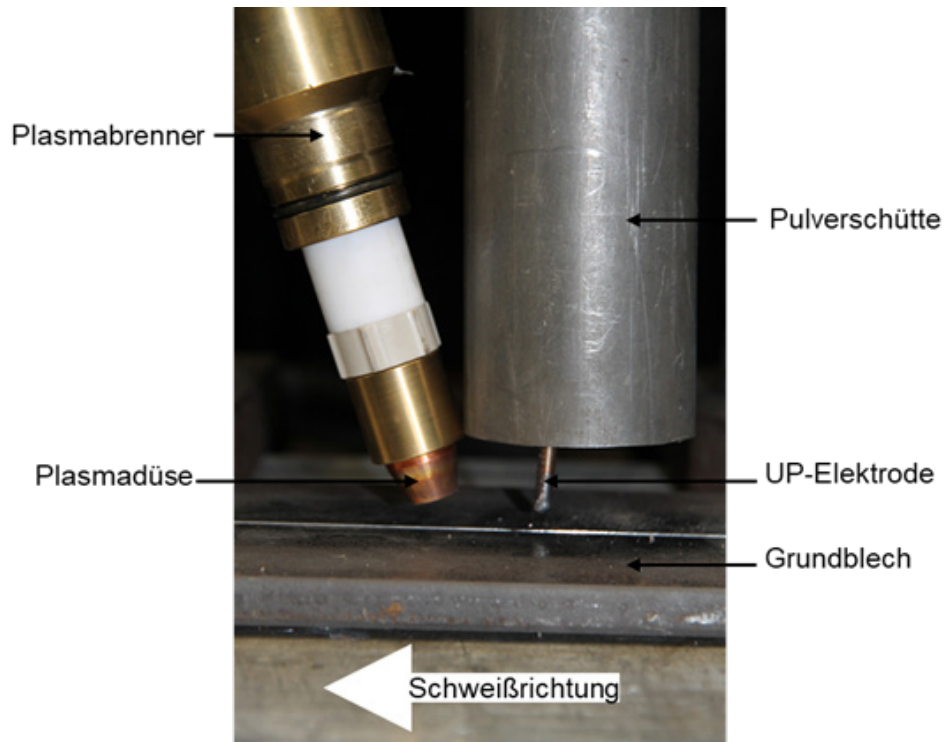
Es ist darauf zu achten, dass das Pulver mit einer leichten Überhöhung in die Nut gefüllt wird. Nach dem Festspannen der Schweißprobe wird das Pulverkissen durch den Anpressdruck verdichtet. Die Bildung von Hohlräumen zwischen Probe und Pulverkissen kann somit ausgeschlossen werden. Die gewählte Badsicherungsvariante dient allerdings nicht ausschließlich dem Zweck der Sicherung gegen Durchsacken der Schweißnaht. Durch das Aufschmelzen des Badsicherungspulvers entsteht ebenfalls eine Schlackeschicht auf der Wurzelseite. Die entstehende Schlacke formt und schützt die Wurzel vor unerwünschten Reaktionen mit der Atmosphäre. Im Laufe der Schweißversuche konnten mit dieser Badsicherungsvariante sehr gute Nahtergebnisse an der Wurzelseite erreicht werden.

Entwicklung einer neuen Pulverschütte

Die am Versuchsstand bestehende Pulverschütte eignete sich für die UP-Referenzschweißungen und für die seriellen Schweißversuche. Die geometrischen Eigenschaften der Pulverschütte machten allerdings die hybride Prozesskombination unmöglich. Der Plasmapbrenner konnte nicht ausreichend nah an den Unterpulverprozess gebracht werden, um ein gemeinsames Schmelzbad im Sinne eines hybriden Prozesses zu erreichen.

Das Pulver wird mit einem Schlauch vom Pulverreservoir in den seitlichen Einlaufstutzen der Pulverschütte gefördert. Anschließend fließt das Pulver konzentrisch zur Drahtelektrode direkt in die Prozesszone der Elektrode. Durch vertikales Verschieben der Pulverschütte am Kontaktröhrlässt sich die gewünschte Pulverschütthöhe einstellen. Zur Vereinfachung der Ausrichtung der Pulverschütte wurden drei Schrauben in die Konstruktion integriert.

Durch die elektrische Leitfähigkeit des Schraubenmaterials steht die Schütte somit ebenfalls unter Strom. Zur Verhinderung eines elektrischen Nebenschlusses bei einer eventuellen Kollision der Pulverschütte mit einem



_Abb. 3: Hybride Prozessanordnung

Element der Schweißanlage, muss die Pulverschütte vom Kontaktrohr elektrisch isoliert werden. Zu diesem Zweck wurde mittels ProEngineer ein Isolationsring konstruiert und mit Hilfe eines 3D-Druckers hergestellt. Dieser Ring soll den blanken Kontakt zwischen Kontaktrohr und Befestigungsschrauben verhindern.

In Abbildung 3 ist zu sehen, dass die optimierte Pulverschütte es nun ermöglicht den UP- und den Plasmaprozess ausreichend nah zusammen zu bringen, um eine gemeinsame Prozesszone zu erreichen.

Probengeometrien

Die Schweißversuche bestehen aus Stumpfschweißungen mit I-Nahtvorbereitung an Blechen aus unlegiertem Baustahl. Die Blechdicken betragen dabei 8mm, 10mm und 12mm und die Versuche werden mit einer Spaltweite zwischen 1 – 4mm durchgeführt. Bei der seriellen und hybriden Prozesskopplung hat sich im Laufe der Versuche gezeigt, dass es zu Instabilitäten im Ein- und Auslaufbereich kommen kann. Aus diesem Grund wurde bei diesen Versuchen auf die Verwendung von Ein- und Auslaufblechen zurückgegriffen.

Versuchsdurchführung

Der Fokus der Versuche im Rahmen dieser Arbeit lag in der Abbildung eines reinen UP-Parametersatzes aus der Industrie und in der Einstellung eines stabilen Prozesses für die serielle sowie für die hybride Verfahrenskopplung. Im Laufe der Untersuchungen wurden die wichtigsten Prozessparameter ermittelt und mit dem Ziel die Grenzen hinsichtlich der maximalen Prozessgeschwindigkeit zu bestimmen, variiert. Es zeigte sich, dass es eine Vielzahl an Parametern gibt, welche einen Einfluss auf den Schweißprozess haben und dass bereits geringe Parametervariationen einen erheblichen Einfluss auf den Prozess haben können. Außerdem wurden Sägeschnitte der erstellten Schweißungen zur Anfertigung von Schliffbildern, Härtemessungen und der chemischen Zusammensetzung entnommen.

Bewertung der Ergebnisse

Vergleichende Schweißungen an unterschiedlichen Blechdicken konnten das Potenzial der neuen Verfahren gegenüber dem Unterpulververfahren zeigen.

Die Untersuchungen konnten zeigen, dass sowohl mit der seriellen als auch der hybriden Prozesskopplung eine Steigerung der Einbrandtiefe und damit eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit gegenüber

dem reinen Unterpulverprozess erreicht werden kann. Der serielle Prozess ermöglichte eine Verbesserung der Schweißergebnisse bei einer Blechdicke von 8mm und 10mm. Der hybride Prozess führte bei einer Blechdicke von 8mm und 12mm zu besseren Ergebnissen.

Es konnte festgestellt werden, dass die serielle und die hybride Prozesskopplung bei den untersuchten Blechdicken in etwa zu der gleichen Geschwindigkeitssteigerung gegenüber dem reinen Unterpulverprozess führen. Lediglich bei einer Blechdicke von 12mm konnten mit Hilfe der hybriden Prozesskopplung eine weitere Steigerung der Schweißgeschwindigkeit gegenüber dem seriellen Prozess erzielt werden. Infolgedessen war es möglich die thermische Überlastung des Pulvers, welche bei den seriellen Untersuchungen an den 12mm Blechen aufgetreten ist, mit dem hybriden Prozess zu vermeiden.

Durch die erreichte Steigerung der Schweißgeschwindigkeit konnte mit der seriellen und der hybriden Prozesskopplung die Streckenenergie trotz einer erhöhten Gesamtprozessenergie auf ein mit dem reinen Unterpulverprozess vergleichbares Niveau reduziert werden. Die Dimensionen der Wärmeeinflusszonen waren infolgedessen ebenfalls mit denen des reinen UP-Prozesses vergleichbar.

Die hybriden Untersuchungen an den 12mm Blechen ermöglichten es sogar die Streckenenergie unter das Niveau des reinen UP-Prozesses zu senken. Infolgedessen weist die Wärmeeinflusszone der hybriden Naht eine geringere Breite gegenüber der reinen UP-Naht auf. Chemische Untersuchungen des Grundgefüges und der Schweißnähte bewiesen, dass keines der untersuchten Verfahren zu einem signifikanten Abbrand von Legierungselementen führte. Härteuntersuchungen der geschweißten Proben lassen allerdings darauf schließen, dass der hybride Prozess zu einer höheren Aufhärtung des Gefüges führt als der serielle und der reine Unterpulverprozess.

Es konnte ebenfalls beobachtet werden, dass der hybride Prozess vor allem bei Verwendung von höheren Stromstärken zu einer speziellen Formung der Nahtoberfläche führt, welche sich signifikant von der des seriellen und des reinen Unterpulverprozesses unterscheidet. Zudem führt der hohe Plasmagasstrom beim hybriden Prozess, durch Herausdrücken von flüssiger Schmelze aus dem Schweißspalt, zur Bildung von oberflächlichen Nahtfehlern.

Eine der wichtigsten Erkenntnisse, welche bei den Untersuchungen des hybriden Prozesses gewonnen wurde ist, dass es vor allem bei größeren Spaltweiten zu einem Vorlauf flüssiger Schmelze vor den Plasmaprozess kommt. Dies führt neben der genannten oberflächlichen Nahtfehlern, zu einer Durchmischung der Schmelze mit Plasmagas. Bei geringen Schweißgeschwindigkeiten kann die flüssige Schmelze ausreichend entgasen. Bei hohen Schweißgeschwindigkeiten hingegen wird eine ausreichende Entgasung der Schmelze durch die Schlackenschicht des Unterpulverprozesses wesentlich erschwert. Eine hohe Instabilität des Prozesses und der Schweißnaht sind die Folge.

Zukünftige Untersuchungen des hybriden Prozesses könnten sich auf den Einfluss unterschiedlicher Pulverarten auf die Entgasungsmöglichkeit der Schmelze konzentrieren. So könnte beispielsweise ein Pulver, welches eine Schlackenschicht mit einer geringeren Viskosität bildet, die Entgasung der Schmelze verbessern. Des Weiteren könnte in zukünftigen Untersuchungen versucht werden, den Vorlauf der Schmelze zu verhindern. In diesem Fall würde es nicht erst zu einer Durchmischung der Schmelze mit Plasmagas kommen.

Vor allem im Laufe der hybriden Untersuchungen konnte eine hohe thermische Belastung des Plasmabrenners festgestellt werden. Die Plasmadüsen wiesen einen sehr hohen Verschleiß aufgrund thermischer Überlastung auf. Bei weiteren Untersuchungen des hybriden Prozesses sollte der Fokus, im Sinne einer höheren Prozessstabilität und einer geringeren Anlagenbeanspruchung, auf die Entwicklung von thermisch höher belastbaren Plasmadüsen gesetzt werden.

Quellen

[Man98] Manzon Luciano:

Welding in the shipbuilding industry: The experience at Fincantieri,
Welding review international (1998) ,2, S. 6–8.

[Rei14]: Reisgen Uwe, Olschok Simon , Jakobs Stefan,
Mavany Michael:

Hydra and Lupus – The exotics among the hybrid welding methods,
ISF Aachen, Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen,
Veröffentlichung, 2014.

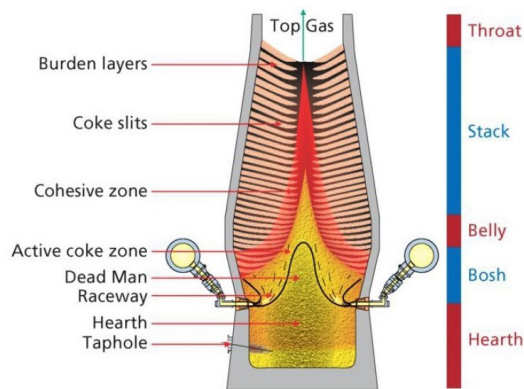
[ROJ14]: Reisgen Uwe; Olschok Simon; Jakobs Stefan:

8th International Conference on Photonic Technologies LANE
2014 Laser Submerged Arc Welding (LUPuS) with Solid State Laser,
Aachen, 2014.

Prix d'excellence 2019

FUTURE OF STEELMAKING - OUTLOOK TO 2050_

Michelle Salmon



_Scheme: Blast furnace

The iron- and steel industry is the largest energy consumer in the industrial sectors and therefore associated with emissions of CO₂ and other pollutants. Iron and steelmaking processes are still mostly coal-based and hence highly dependent on fossil fuels, releasing considerable amounts of CO₂. The energy consumption is recognized as one of the largest industrial sources of direct CO₂ emissions. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change, the steel industry accounts for 4 – 5% of the total world CO₂ emission. The International Energy Agency (IEA) reported CO₂ emissions from manufacturing industry accounts about 40% of the total CO₂ emissions worldwide and iron and steel manufacturing industry contributes the biggest share of around 27% of the global manufacturing sectors.

The most common ironmaking process used in the world is the blast furnace route which contributes around 70% of the world's steel production.

The blast furnace is the heart piece of the so-called integrated steel plant. It consists of several units performing different interconnected processes and exchanging mass and energy flows with each other.

In the blast furnace iron ore is reduced and melted to create pig iron (hot metal). The hot metal is then directed into the basic oxygen furnace where an oxidation is performed to reduce the carbon content of the metal, remove impurities and create liquid steel.

The CO₂ emission from the blast furnace is estimated to be 1800 kg per ton hot metal (HM). The theoretical minimum carbon (coke and coal) needed for the blast furnace is 414kg per ton HM from which 333kg (80%) is required only for chemical reactions while the rest 81kg (20%) is required for heat generation.

From both economic and environmental aspects, an intensive work has been carried out in order to decrease the coke consumption in the blast furnace. The blast furnace has undergone tremendous modification, which led to the decreasing of coke consumption from 1000kg per ton HM in 1950s to 350kg per ton HM in 2008.

Nevertheless, a further lowering of reductant consumption and CO₂ emissions is still required.

Besides the traditional ironmaking process there are two less common procedures to produce iron.

Direct reduction is the removal (reduction) of oxygen from iron ore in its solid state. This technology includes a group of processes based on different feedstocks, furnaces and reducing agents. Mostly natural gas (and in some cases coal) is used as a reducing agent to enable this process. The metallization of the product, called direct reduced iron (DRI) or 'sponge iron', ranges from 85 to 95%.

Smelting reduction (SR) means melting involving chemical reduction reactions. It involves a group of processes, which produce liquid hot-metal from iron ore by using coal instead of coke as reductant. SR technology includes both solid-state reduction and smelting. The principle is that coal can be gasified in a bath of molten iron.

The smelting process consists of two vessels or two zones, a pre-reduction unit and a smelting vessel. The process, however, does not necessarily require two separate vessels.

The most promising innovative "green" technologies are using hydrogen or electricity as reducing agent instead of carbon-based raw materials.

The hydrogen direct reduction is very similar to the standard DR process. The difference is the use of hydrogen as reducing agent instead of natural gas. The kinetic effects in the hydrogen-based reduction are comparable with those in the carbon-based reduction. Most of the reaction features are very similar and many

mechanisms are common. Nevertheless, a significant difference is that the iron ore reduction with hydrogen is mainly endothermic whereas the carbon monoxide reduction is mainly exothermic.

Electrowinning is a technology in early stage where iron is produced by electrolysis. The process produces direct reduced iron by means of an alkaline electrolysis. At the cathode the reduction of the iron oxide into iron takes place. At the anode oxides donate electrons, under formation of oxygen.

The process allows the transformation of iron ore into metal and gaseous oxygen (O₂) using only electrical energy. This eliminates the need of pre-treatment units such as sinter plants, coke ovens or reformers. Additionally, the process doesn't require any carbon-based raw materials, which eliminates the creation of CO₂ emissions. Although no iron is currently produced industrially by electrolysis, electrolysis is a well-established technique developed at the industrial scale for production of aluminum, zinc and nickel.

Making predictions about fluctuating and highly influenceable energy and CO₂ prices is difficult. It is still unknown, if the targets that were set by worldwide organizations are achievable in the desired time frame. Therefore, it is common to use scenarios to cover a wide spectrum of future developments. Scenarios are hypothetical but precise and consistent description of future situations, including the transition path from the present to the future state. In the current research three different scenarios are depicted as hypothetical projections (based on the goals of Germany).

In the ambitious scenario the energy transition is realized faster than expected. The emission reduction target of 80% by 2050 is expected to be already reached in 2040. The high proportion of renewable energy sources leads in times of high production rates (e.g. strong winds, intensive solar radiation) to an oversupply. This is balanced out with large underground hydrogen storages. As a result, hydrogen can be produced from cheap renewable peak electricity which plays an increasingly important role in industrial processes and in the transport sector. After 2040 electricity prices will fall below present price levels and past 2050 CO₂-free electricity is available in the grid. CO₂ allowance prices will rise fast over the next decades due to internationally binding emission targets

and an international trading market causing CO₂-intensive processes to be less profitable.

In the moderate scenario the transition of the energy sector is realized consequently at the pace expected. A high proportion of renewable energy sources cause times of oversupply with very cheap peak-electricity prices. CO₂ prices will rise moderately through a consistent nation trading system without many fluctuations. Fossil fuel power plants guarantee grid stability in combination with innovative monitoring and controlling systems and smart grids. Electro-mechanical technologies dominate the transport sector past 2050.

In a conservative scenario which assumes the ongoing transition activities to continue. Here, there wouldn't be made any extraordinary efforts to overcome the current difficulties regarding offshore wind and public pressure against rising energy prices. Consequently the 80% emission reduction target is delayed until 2070, slowing down the integration of renewable energies and keep on relying on the fading stocks of fossil fuels. CO₂ prices only rise slowly since no internationally binding targets are passed. The nuclear phase-out is nevertheless realized by 2022.

The predictions of the coke prices vary widely in literature. Some researchers expect a price increase of 3,4% per year until 2050, due to increased procurement costs and taxes for coke. Others predict an annual price increase between 1,4% and 2,8%. Coke is a special coal which does not follow the normal price variation for hard coal but correlates closely with the worldwide production of iron and steel. So, the volume of steel production plays also a role in the price development. A growth is expected at least until 2050. The coal prices will likely stay constant over the next decades. The worldwide coal supply will last at least for another 150 years. Currently coal is easily available due to over-mining. Therefore, there is no dramatic price change expected for the current research.

In the past 50 years the iron ore price grew by 2,56% per year. Recent scenario studies of the iron and steel industry predict a yearly price increase of 1,2% until 2050. In mid-term experts expect an oversupply of iron ore by 2020 because steel production grows slower than iron ore mining. Since the iron ore price does not depend on the energy transformation the price projections for all scenarios is the same with a very moderate annual growth rate of 0,75%. The CO₂ price development is very difficult to predict since

it does not exclusively depend on supply and demand dynamics but also heavily on political decisions. Due to the planned exit from nuclear power production in Germany by 2022 and increased CO₂ emission price levels are expected to rise significantly.

Manufacturing industries receive a share of their emission allowances from the European Union for free. This allocation is based on benchmarks that reward most efficient installations in each sector. The benchmark is based on the average greenhouse gas emissions of the best performing 10% of the installations in Europe. Installations that do not reach the benchmarks will receive fewer allowances than they need. In this case they have to buy additional allowances. Since the EU is planning to constantly diminish the overall CO₂ emissions, prices of CO₂ allowances will rise. In addition the benchmarks will be reduced yearly by 1,74%.

Starting from a price level of 14€ per ton CO₂ in 2010. In the ambitious scenario a very strong price increase of 4,2% per year is assumed. For the moderate and conservative scenarios annual growth rates of 3,5% and 2,9% are applied. The natural gas price, like prices for other fossil fuels, will rise continuously due to increasing production costs and growing demand in developing countries. For the ambitious scenario the price rise is 2,3% per year where in the moderate 1,5% and in the conservative scenario 0,8%.

The electricity price depends on the production cost of electricity in fossil fuel plants and from renewable energy sources, weighted by the specific distribution. Especially in the beginning of the investigation period, due to high investments and low utilization, renewable electricity sources are much more expensive than large scale fossil fuel plants. Through very low fix cost and further development of economical efficient renewable technologies the electricity prices will decrease. Additionally, due to the steadily rising prices for fossil fuels, the price developments of renewable and fossil electricity become opposite. The average electricity price is derived as a weighted average of both sources depending on the renewable energy fraction.

In the following decades steelmaking will be influenced by the development of raw material and electricity prices as well as by the costs for CO₂ allowances. Especially the prices of coke and natural gas will increase since resources

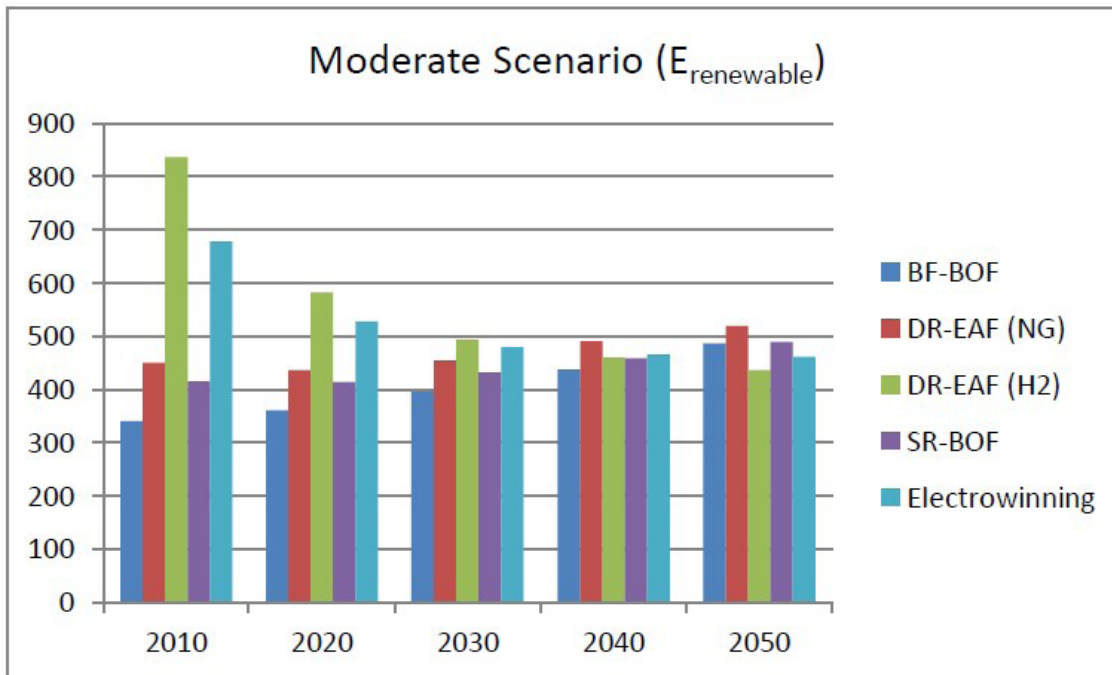
are shrinking. Even though coal resources are limited as well, the price per ton will probably stay stable over the next few decades due to over production of the coal mines. The growing rate of CO₂ allowance costs will mainly depend on political decisions. The rising CO₂ costs will have a major effect on carbon-based steelmaking routes. The electricity price depends on the production costs in fossil fuel plants and from renewable energy sources. In the beginning of the investigation period, the electricity of renewable sources is much more expensive than from large fossil fuel plants.

But the fossil-based electricity cost will continuously rise and in the opposite way renewable-based electricity prices will decrease. Around 2025 renewable-based electricity will start to become cheaper than fossil-based electricity. This is an important change to promote the integration of carbon-free steelmaking routes. The price developments will lead to varying operating expenditures (OPEX). In general, the operating costs of carbon-based steelmaking routes will increase.

In particular the blast furnace is affected by the rising raw material prices (coke and iron ore). Furthermore, the high CO₂ emissions will lead to a noticeable rise of the OPEX. In contrast, the operating costs of the electricity-based steelmaking routes will decrease, if the source of electricity is renewable. Additionally, these routes have no CO₂ emissions and will not be affected by rising CO₂ allowance costs.

Nevertheless, the blast furnace route will probably remain the most profitable route at least until 2030. Yet, steel producers are recommended to invest into the development of innovative solutions like the direct reduction using hydrogen or the Electrowinning technology to reach industrial marketability by 2030 – 2040. Steelmaking is a highly complex process that has developed its current route, the blast furnace route, over centuries by adapting to changing raw materials and consumer requirements. Furthermore, modern blast furnace routes have large production capacities and operate highly efficient.

From a purely environmental viewpoint, a radical technology change towards the most material and efficient route with only marginal CO₂ emissions should be considered. In this case the Electrowinning technology would be the ideal future steelmaking process. This is



_Influence of Peak Electricity (Moderate Scenario)

especially true if electricity from renewable sources dominates. But since the research of this technology is still at the beginning, it is difficult to estimate its market entry. Although, researchers claim that this promising steelmaking process could reach industrial scale by 2040.

Considering the economic and environmental evaluation and assuming the price developments for input material and cost for CO₂ emissions, the direct reduction route using hydrogen shows the greatest potential. This steelmaking route allows economically viable emission reduction. Furthermore, the technology is already proved and available.

The present research highlights that the direct reduction with hydrogen is the most promising substitute for the conventional blast furnace route. Already beginning in 2035 this route could start to become the most profitable steelmaking route.

The hydrogen for this route is produced from natural gas by steam reforming or through water electrolysis. Currently, only 5% of hydrogen is produced by electrolysis but as already mentioned, natural gas will become a rare and expensive raw material. Furthermore, steam reforming would produce CO₂ emissions whereas the target is to produce no emissions with this technology. Therefore, the development of high capacity electrolyzers should be considered as well.

The profitability of the electricity-based steelmaking routes is highly dependent on the evolution of the power sector and the integration of renewable sources. The production of hydrogen affords high amounts of electricity and its deployment is largely dependent on the H₂ economy. A major extension of renewable electrical power is necessary to provide enough electricity including peak electricity to produce hydrogen at a reasonable price.

But it should also be considered that the steel industry won't be the only consumer of electricity and hydrogen in the future and even more important, a buyer of cheap peak electricity.

Nevertheless, steel is an internationally traded product and must therefore be cost-competitive, which necessitates concerted national and international political action.

HORS SERIE

**REVUE TECHNIQUE
LUXEMBOURGEOISE**

HORS SERIE DE LA REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE # 017

