

Intelligente Geotextilien für das Echtzeit-Deichmonitoring

Max Schwab¹, Till Quadflieg¹ und Thomas Gries¹

¹ RWTH Aachen University, Institut für Textiltechnik, max.schwab@ita.rwth-aachen.de

Zusammenfassung

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 „Deichmonitoring und -simulator“ des BMBF-Projekts *EarlyDike* wurden am *Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen University (ITA)* intelligente Geotextilien zur Echtzeit-Feuchtigkeitsmessung im Deich entwickelt und validiert. Dazu wurden unterschiedliche leitfähige Faserwerkstoffe untersucht und elektrisch leitfähige Carbonfasern als Sensorfasern für den Untersuchungsraum ausgewählt. Weiterhin wurden Integrationskonzepte in bestehende textile Herstellungsverfahren für Geotextilien untersucht und verschiedene Füge-technologien für die Geotextilien bezüglich der Verbundfestigkeit charakterisiert. Das Messprinzip beruht auf der Korrelation des elektrisch messbaren Signals zweier Sensorfasern und der physikalischen Umgebungsänderung der Feuchte. Es wurden Langzeitmessungen an einem Modelldeich durchgeführt, in den das intelligente Geotextil auf der Böschungsseite eingebracht ist. Die Versuche zeigen die Eignung der textilbasierten Sensorik sowie der konzipierten Messschaltung zur Detektion von Feuchtigkeitsereignissen.

Schlagwörter

Geotextil, Smart Textiles, Stickverfahren, Füge-technologien, Carbonfasern

Summary

As part of work package 3 "Dike Monitoring and Simulator" of the project EarlyDike, smart geotextiles for real-time humidity measurement within the dike were developed and validated by the Institut für Textiltechnik of RWTH Aachen University (ITA). Different conductive fibre materials were investigated and electrically conductive carbon fibres were selected as sensor fibres for the test area. Furthermore, integration concepts into existing textile manufacturing processes for geotextiles were investigated and various joining technologies for geotextiles were characterized regarding their joint strength. The measuring principle is based on the correlation of the electrically measurable signal of two sensor fibres and the physical change of the humidity of the environment. Long-term measurements were carried out on a model dike channel in which the smart geotextile is inserted on the slope side. The tests show the suitability of the textile-based sensor technology as well as the designed measuring circuit to detect moisture events.

Keywords

geotextiles, smart textiles, embroidery, joining technologies, carbon fibres

1 Einleitung

Intelligente Geotextilien zur Detektion von Belastungen und Beschädigungen von Flussdeichen wurden im BMBF Projekt „Entwicklung von multifunktionalen, sensorbasierten Geotextilien zur Deichertüchtigung“ (FKZ: 02WH0570 bis 02WH0574 und im EU Projekt „UrbanFlood“ (Pengel 2013) eingesetzt. In beiden Projekten wurde der Forschungsschwerpunkt auf Deiche im Binnenbereich und die damit verbundenen hydrodynamischen Prozesse (Hochwasser) gelegt. Die aus dem Hochwasser resultierenden Beschädigungen im Deich ereignen sich langsamer und weniger dynamisch als in Küstenregionen. In den Projekten wurden daher Technologien zur Erkennung nicht sichtbarer, langsam eintretender Versagensmechanismen berücksichtigt.

Zur Zustandsüberwachung in Verstärkungstextilen werden üblicherweise faseroptische Systeme, sogenannte Fibre Bragg Grids, mit einem Lichtwellenleiter im Kern eingesetzt. Dabei wird über eine Lichtquelle ultraviolettes Licht in das Faserende eingekoppelt. Mit einem zweiten Gerät wird das durch die Faser reflektierte Licht gemessen und die Änderungen in der Lichtwelle ermöglichen eine Aussage über die lokale Längenänderung der Faser (Frank 2001). Solche Systeme haben eine hohe Messgenauigkeit und sind in verschiedenen Ausprägungen als kommerzielle Produkte bei einer Vielzahl von Industrieunternehmen erhältlich. Faseroptische Sensoren werden zur Überwachung von Gebäuden und Geotextilien eingesetzt und sind besonders geeignet um sehr kleine Längenänderungen, z. B. $< 1\%$ zu messen (Elsner 2009, Thiele 2009). Das Sensor-Prinzip im Projekt *EarlyDike* zielt auf die Erschließung flächiger Messungen mittels kostengünstigerer elektrisch leitfähiger Sensorfasern, die über weite Lauflängen in die bereits verwendeten Geotextilstrukturen integriert werden. Dabei wird ganz bewusst eine geringere Auflösung der Messgenauigkeit zu Gunsten einer vollflächigen Überwachung genutzt. Der Vorteil der Verwendung von Carbonfasern gegenüber den faseroptischen Sensoren liegt in der Robustheit der Materialien, da die faseroptischen Sensoren bei Einwirkung höherer Belastung unter Knicken zerstört werden können. Außerdem ist die Schnittstelle zur Lichteinkopplung aufwändig und komplex.

Im folgenden Teilbericht des Projekts *EarlyDike* wird die Entwicklung, Prototypenherstellung und Validierung des intelligenten Geotextils für das Deichmonitoring von Seedeichen beschrieben. Die Entwicklung erfolgte in enger Kooperation zwischen dem *ITA*, dem *Institut für Wasserbau und Wassermwirtschaft (IWW)* der *RWTH Aachen University* und dem *Geodätischen Institut (gia)* der *RWTH Aachen University* (Krebs und Schüttrumpf 2018, Herlé et al. 2018).

Zunächst werden im Stand der Technik (Kapitel 2) die Grundlagen zu textilen Sensormaterialien zur Messung von Feuchtigkeit bzw. Dehnung in Deichbauten vorgestellt. Anschließend wird kurz auf ausgewählte Textilverfahren zur Herstellung von Sensortextilien eingegangen. In Kapitel 3 werden die Grundlagen zum Messprinzip der Feuchtigkeitsmessung mit Sensorfasern, sowie die notwendige Messelektronik zur Sensorauswertung vermittelt. Zur Validierung eines ersten Prototyps des intelligenten Geotextils (Messvlies I) wurden kleinmaßstäbliche Untersuchungen am *IWW* durchgeführt. Das im Anschluss entwickelte intelligente Geotextil für den großmaßstäblichen Modelldeich wird in Kapitel 4 beschrieben. Dabei werden zunächst textile Fügeverfahren zur Integration der Feuchtigkeitssensoren in das Geotextil vorgestellt. Auch die Möglichkeiten der Sensor-Beschichtung bzw. -Kaschierung spielen eine Rolle. Der Aufbau des großmaßstäblichen

Modelldeichs und die dort durchgeführten Validierungsversuche des intelligenten Geotextils wurden am *IWW* durchgeführt und sind in Krebs und Schüttrumpf (2018) beschrieben. Die Auswerteeinheit zur Messung der Feuchtigkeit am intelligenten Geotextil wird in Kapitel 5 dargestellt, vor allem die Weiterentwicklung der Messelektronik und die gesamte Messkette. Dabei steht vor allem die Datenübergabe zum GeoPortal im Vordergrund, das vom *gia* im Projekt entwickelt wurde. In Kapitel 6 wird eine Simulation eines Feuchtigkeitsereignisses vorgestellt. Dabei soll die Validierung der Messkette gezeigt werden.

2 Stand der Technik

Im Forschungsprojekt *EarlyDike* werden Carbonfasern sowie Edeldstahlgarne als Sensor-materialien betrachtet, die als Grundlage der Entwicklung von intelligenten Geotextilien dienen. In den folgenden Unterkapiteln werden der Stand der Technik für beide Materialien sowie ausgewählte Textilverfahren zur Herstellung von intelligenten Geotextilien dargestellt.

2.1 Textile Sensorfasern

Als Sensorfasern werden sowohl Metallfasern aus Edelstahl, als auch Polyacrylnitril (PAN)-basierte Carbonfasern eingesetzt. Beide Arten von Fasern weisen einen vollen textilen Charakter auf. Daher ermöglichen ihre Steifigkeit und Handhabbarkeit eine Verarbeitung mit Textilmaschinen. Die Sensorfunktion ist abhängig vom elektrischen Widerstand, welcher wiederum vom eingesetzten Werkstoff und vom Querschnitt der Faserbündel (Rovings) bzw. Garne abhängt. Bei Garnen wird das spezifische Längengewicht, der Titer (Garnfeinheit), in der Einheit tex (Gramm pro 1000 m) angegeben. In der Anwendung werden für jede Art der Fasern zwei unterschiedlicher Faserfeinheiten untersucht. Die Fasern aus Tabelle 1 werden im Projekt hinsichtlich ihrer Eignung als Deichsensorfasern untersucht und getestet.

Tabelle 1: Übersicht relevanter technischer Eigenschaften für Carbonfasern und Edeldstahlgarn.

Fasertyp	Herstellerbezeichnung	Garnfeinheit [tex]	El. Widerstand [Ω/m]	Zugfestigkeit [MPa]	Preis [€/kg]
AISI 316L Edeldstahlgarn	ZF 12/275/2	530	28 Ω/m	500	1
AISI 316L Edeldstahlgarn	ZF 12/1000/2	1730	13 Ω/m	500	1
24K Carbonfaser	SIGRAFIL C40 T024 EPY	1600	17 Ω/m	5000	30
50K Carbonfaser	SIGRAFIL C30 T050 EPY	3300	8 Ω/m	5000	25

2.1.1 Carbonfasern

Carbonfasern vereinen die Eigenschaften hohe Zugfestigkeit und hohe Steifigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht. Daher sind sie der ideale Konstruktionswerkstoff für hochbeanspruchte Bauteile in Leichtbauanwendungen. Sie bestehen zu 92 % bis 99,9 % aus

Kohlenstoff. Reiner Kohlenstoff lässt sich nicht zu Fasern verspinnen, da der Tripelpunkt bei rund 4.600 K in einer Überdruckatmosphäre von etwa 10 MPa liegt. Daher wird zur Herstellung von Carbonfasern ein Umweg über eine kohlenstoffreiche Endlosfaser, den Precursor, gemacht. Dieser ist bei den meisten technischen Verfahren ein hochverstrecktes Polyacrylnitril(PAN)-Filament. Das Herstellungsverfahren selbst gliedert sich in die Stufen Pyrolyse, Carbonisierung und Graphitisierung. Der Durchmesser eines Carbonfilaments beträgt zwischen 5 μm und 7 μm . Die Einzelfilamente werden zu einem Roving zusammengefasst. Dessen Bezeichnung richtet sich üblicherweise nach der Anzahl der Filamente, die zusammengefasst sind. Je 1.000 Filamente werden mit der Angabe 1K bezeichnet. Übliche Lieferformen für Rovings sind 1K (67 tex), 3K (200 tex), 6K (400 tex), 12K (800 tex), 24K (1600 tex) sowie Heavy Tows mit 50K und mehr. Die elektrische Leitfähigkeit und das Festigkeitsverhalten sind anisotrop ausgeprägt. In Faserrichtung weisen Carbonfasern aufgrund ihrer molekularen Struktur hohe Zugfestigkeiten und eine hohe elektrische Leitfähigkeit auf. Quer zur Faserrichtung sind Festigkeit und Leitfähigkeit gering (Cherif 2011).

2.1.2 Edeltstahlgarne

Metallgarne haben eine ausgezeichnete elektrische Leitfähigkeit unter den elektrisch leitfähigen Fasern. Zudem wird die elektrische Leitfähigkeit nicht von der Umgebungsfeuchtigkeit beeinflusst. In jüngster Zeit wurden Edeltstahlfasern entwickelt, die zwar schwieriger zu verarbeiten sind, jedoch Garneigenschaften für den Einsatz in Hightech-Anwendungen bieten.

Neben der hohen Zugfestigkeit ist ein weiteres wichtiges Merkmal von Edeltstahlgarnen, dass sie sich chemisch inert verhalten. Sie sind hitze-, korrosions- und säurebeständig. Besonders Edeltstahlfasern und -garne können als Verstärkung von Geotextilien zur Herstellung von Geogittern eingesetzt werden. Dabei werden Metallfasern mit anderen synthetischen Garnen gemischt (Uddin 2010).

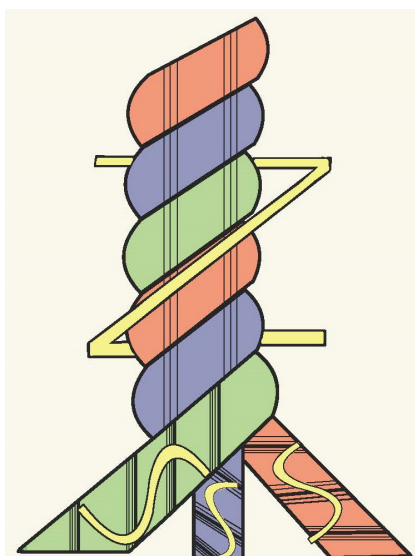


Abbildung 1: Verdrehung von Garnen schematisch (Gries 2015).

In der Form von Garnen wird das Dehnungsverhalten durch die Garnstruktur beeinflusst. Durch sogenannte Z- oder S-Drehung (siehe Abbildung 1) sowie das Verzwirnen mehrere Garne lassen sich Dehnungsbereiche einstellen (Gries 2015).

2.2 Faserbasierte Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring)

Zur Zustandsüberwachung mittels textilintegrierter Strukturen kommen vornehmlich zwei physikalische Prinzipien zum Einsatz: optische und das elektrische Messverfahren. Bei optischen Messverfahren wird die mechanische Änderung der Faser mit Hilfe einer optischen Auswerteeinheit gemessen und anschließend in ein elektrisches Signal umgewandelt. Bei elektrischen Messverfahren wird ein elektrisch leitendes Material eingesetzt, welches bei einer Längenänderung seine Leitfähigkeit ändert. Ähnlich wie bei dem Einsatz von Dehnmessstreifen lässt sich so ein fadenförmiger Sensor – wie im Projekt *EarlyDike* eingesetzt – direkt kontaktieren.

Zur Dehnungsmessung mittels elektrisch leitender Garne wurden im BMBF Projekt V3TEX038 „Smart Rope“ fadenförmige Sensoren in die Geflechtstruktur eines synthetischen Faserseils integriert. Der Einsatz von Sensorik dient zur Überlast- und Verschleißkontrolle in synthetischen geflochtenen Seilen. Die Entwicklung eines integrierten textilbasierten Monitoringsystems ermöglicht eine objektive Beurteilung des Belastungs- und Verschleißzustands. Durch die Vereinfachung und Verkürzung der Wartung werden Kosten eingespart. So wird die Wartung eines Gleitschirmes mit Hilfe des Systems von zwei Stunden auf zehn Minuten verkürzt. Zudem wird eine ressourcenschonende Verwendung durch die Vermeidung prophylaktischen Austauschs erzielt. Die Überlastkontrolle ermöglicht zudem die Reduzierung der konstruktiven Sicherheit, woraus Materialeinsparungen resultieren (Wipfler 2010).

Messgitter aus Kohlenstofffasern wurden bereits erfolgreich in glasfaserverstärkten Laminaten als Sensoren integriert. Mittels relativ dünner Carbonfaseroovings, meist 1K-Fasern, wurden hier die Korrelation zwischen Dehnung und die proportionale Änderung des elektrischen Widerstands nachgewiesen (Christner 2013, Horoschenkoff 2009, Horoschenkoff 2011).

2.3 Ausgewählte Textilherstellungsverfahren für intelligente Geotextilien

Textilstrukturen, wie sie für die Anwendung im Wasserbau zum Einsatz kommen, sind durch ihre Funktion gekennzeichnet. Die Funktionen, die sie übernehmen, sind Bewehrung, Filtration, Trennung, Erosionsschutz und Drainage. Bei verstärkenden Strukturen kommen aufgrund des geringen Bewehrungsgrades gitterartige Strukturen zum Einsatz, die üblicherweise gewebt oder gewirkt sind. Bei flächigen Textilien werden Gewebe und Vliese eingesetzt (siehe Abbildung 2).

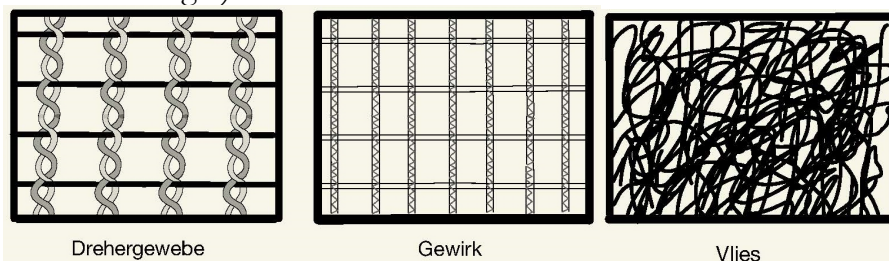


Abbildung 2: Typische Textilstrukturen (Quadflieg 2017).

Alle zum Einsatz kommenden Textilien haben eine begrenzte Breite quer zur Produktionsrichtung, die je nach Typ und Maschine zwischen 1 m und 5 m liegt. In Produktionsrichtung werden hohe Lauflängen aufgerollt, die in der Regel nur durch Prozesse wie Transport

und Handhabung limitiert sind, hier sind mehrere 100 Laufmeter üblich. Für den Einsatz flächiger Sensoren, die bereits im textilen Herstellungsverfahren integriert sind, eignet sich daher eine Einbringung in Produktionsrichtung. Die einzige Textilstruktur, in der die Garne in Produktionsrichtung (Kettfäden) gestreckt vorliegen, sind Gewirkstrukturen. Bei den anderen Verfahren muss ein gestrecktes Fadensystem in einem weiteren Bearbeitungsschritt gefügt werden (Quadflieg 2017).

3 Grundlagen der Feuchtigkeitsmessung im Deich

Zur Integration faserbasierter Sensoren werden die physikalischen Größen, in diesem Fall Feuchte und Dehnung, in ein elektrisches Signal (Spannung) übertragen. Elektrische Signale können durch eine Auswerteinheit verarbeitet werden. Die Sensoranordnung erfolgt in Korrelation zur Änderung der Messgröße und des sich daraus ergebenden auszuwertenden elektrischen Signals (siehe Abbildung 3). Der Feuchtesensor besteht aus zwei parallelen Leiterbahnen, die auf ein Geotextil aufgebracht sind. Durch Änderung der Umgebungsfuchte ändert sich das Dielektrikum zwischen den Leiterbahnen. Im trockenen Zustand ist der Widerstand zwischen den Leiterbahnen nahezu unendlich groß. Durch die Präsenz von Flüssigkeit (z. B. elektrolythaltiges Wasser) ändert sich der Widerstand zwischen den Leiterbahnen messbar. Die Interpretation der Zustände in der Auswerteinheit ist abhängig von den umgebenden Materialien und der Menge an eingebrachter Flüssigkeit.

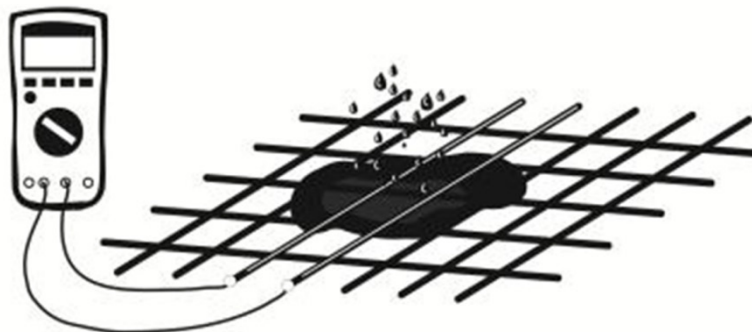


Abbildung 3: Messprinzip für die faserbasierte Feuchtigkeitsmessung im Deich.

3.1 Messprinzip

Ein einzelner Kanal besteht aus einem Referenzwiderstand R_{Ref} und zwei Carbonrovings, welche das Sensorpaar bilden. Das Funktionsprinzip wird anhand des in der Abbildung 4 links eingezeichneten trockenen Zustandes beschrieben. Durch Wasserkontakt bildet sich eine elektrische Verbindung zwischen den Carbonrovings. Das Ersatzschaltbild eines solchen Kanals im feuchten Zustand ist in Abbildung 4 rechts dargestellt.

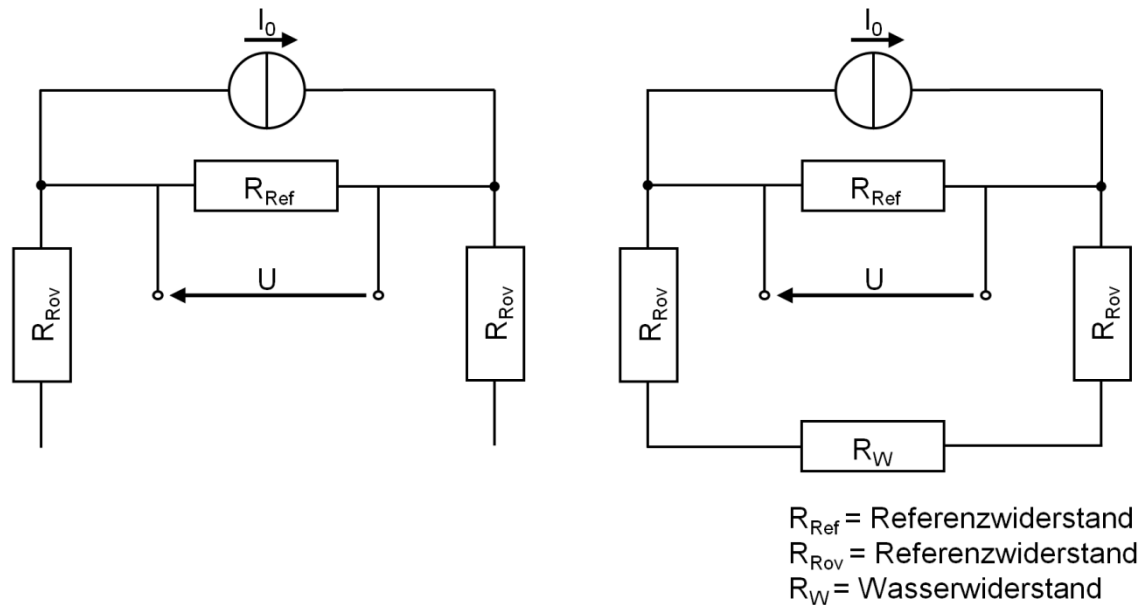


Abbildung 4: Ersatzschaltbild eines Sensorkanals in der Messschaltung mit Gleichstromquelle im trockenen Zustand (links) und bei Wasserkontakt (rechts).

Zu Beginn des Projekts *EarlyDike* wurde für die Messung der elektrischen Signale der Wasserstandsmessung eine Messschaltung entwickelt (Abbildung 5). Für Versuche wurde als Signaleingang eine Messelektronik mit einer Gleichstromquelle entwickelt. Es lassen sich beliebig viele Kanäle (Sensorpaare) in die Schaltung einfügen.

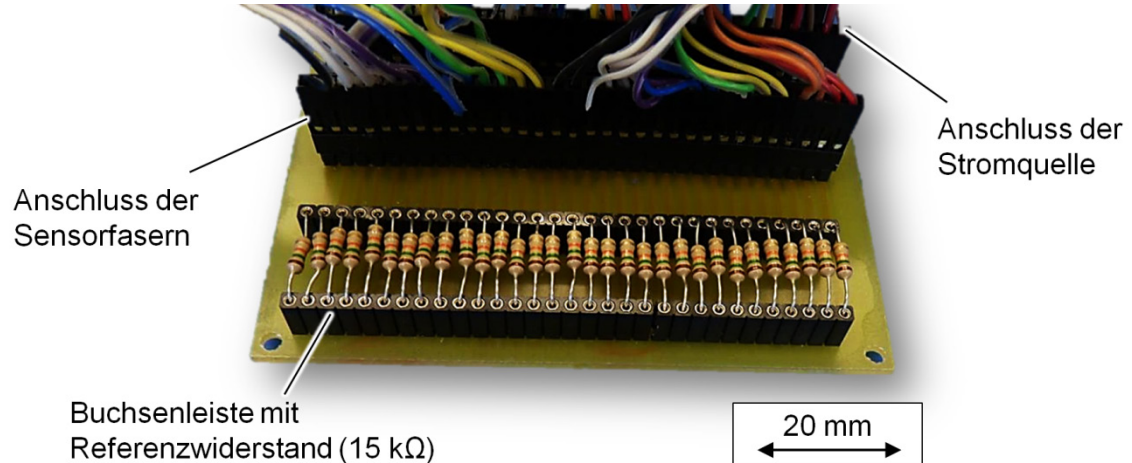


Abbildung 5: Erster Prototyp der Messschaltung für die Feuchtigkeitsmessung im Geotextil.

Auf der Messschaltung sind die Sensorfasern kontaktiert sowie die Referenzwiderstände implementiert. Die Zuführung zu den Sensorpaaren wurde zunächst über Stifileisten und Stiftbuchsen realisiert.

3.2 Prototyp des Geotextils

Für erste Versuche am kleinmaßstäblichen Modelldiich des *IWW* wurden die Messvliese I und II entwickelt. Dafür wurden Polypropylen-Geotextilien mit Flächengewichten zwischen 300 und 600 g/m² der Firma *Naue GmbH & Co. KG, Espelkamp-Fiestel* genutzt.

Carbonfasern der Firma *SGL CARBON SE, Wiesbaden* mit einem Titer von 1.600 tex (24.000 Filamente) wurden über ein spezielles Stickverfahren (Tailored Fibre Placement) auf das Geotextil aufgestickt (siehe Abbildung 6), das in Kapitel 4.1.3 beschrieben wird. Die Carbonfilamente eines jeden Carbonfaserbündels wurden über versilberte Aderendhülsen formschlüssig verbunden und mit Kupferdrähten angelötet und entsprechend zur Messschaltung aus Kapitel 3.1 geführt. Die Validierung von Messvlies I ist im folgenden Kapitel beschrieben.

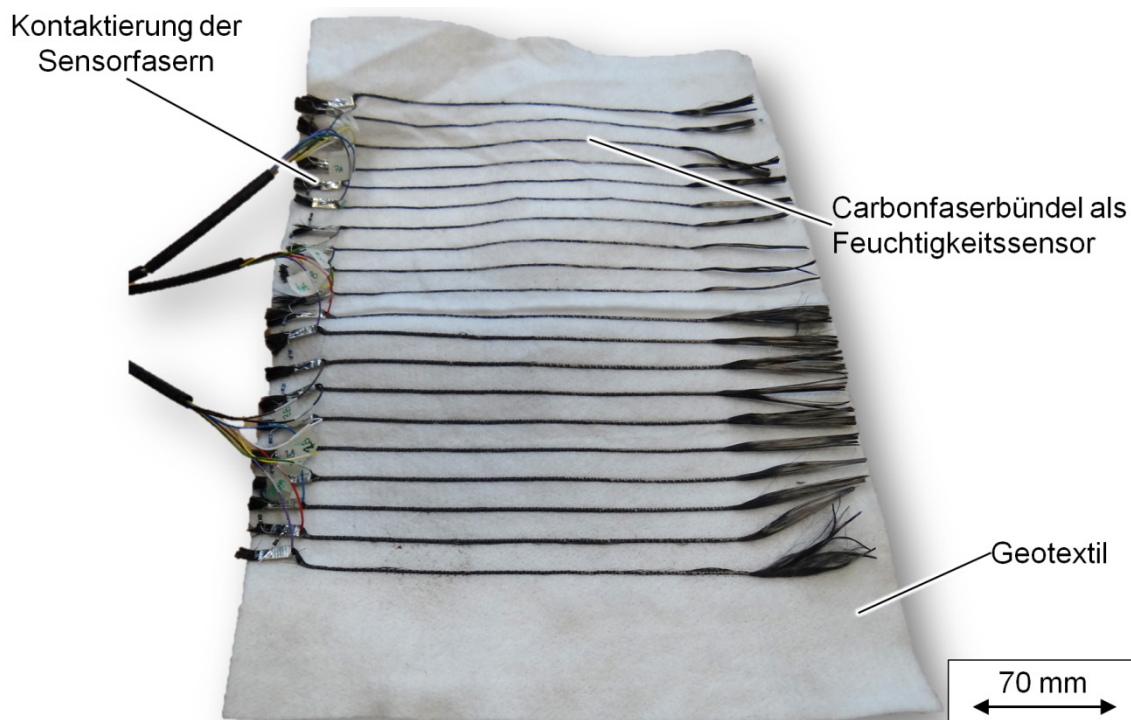


Abbildung 6: Erster Prototyp eines intelligenten Geotextils zur Feuchtigkeitsmessung mit angestickten Carbonfaserrovings (Messvlies I).

3.3 Validierung am kleinmaßstäblichen Modelldeich

Die Prototypen der Messschaltung sowie das intelligente Geotextil (Messvlies I und II) wurden am *IWW* in einem Versuchsaufbau validiert (Abbildung 7). In einer Kippbinne wurde ein kleinmaßstäblicher Sanddeich aufgebaut und das Sensor-Geotextil unter einer ca. 1 cm dicken Sandschicht integriert. Die Anschlusskabel wurden entlang der Deichrinne seitlich herausgeführt. Mit stetig steigendem Wasserstand ist die Sickerlinie innerhalb des Deichquerschnitts in Abbildung 7 erkennbar. Der Aufbau des kleinmaßstäblichen Modelldeichs und die Versuchsdurchführung am Deich können Krebs und Schüttrumpf (2018) entnommen werden.

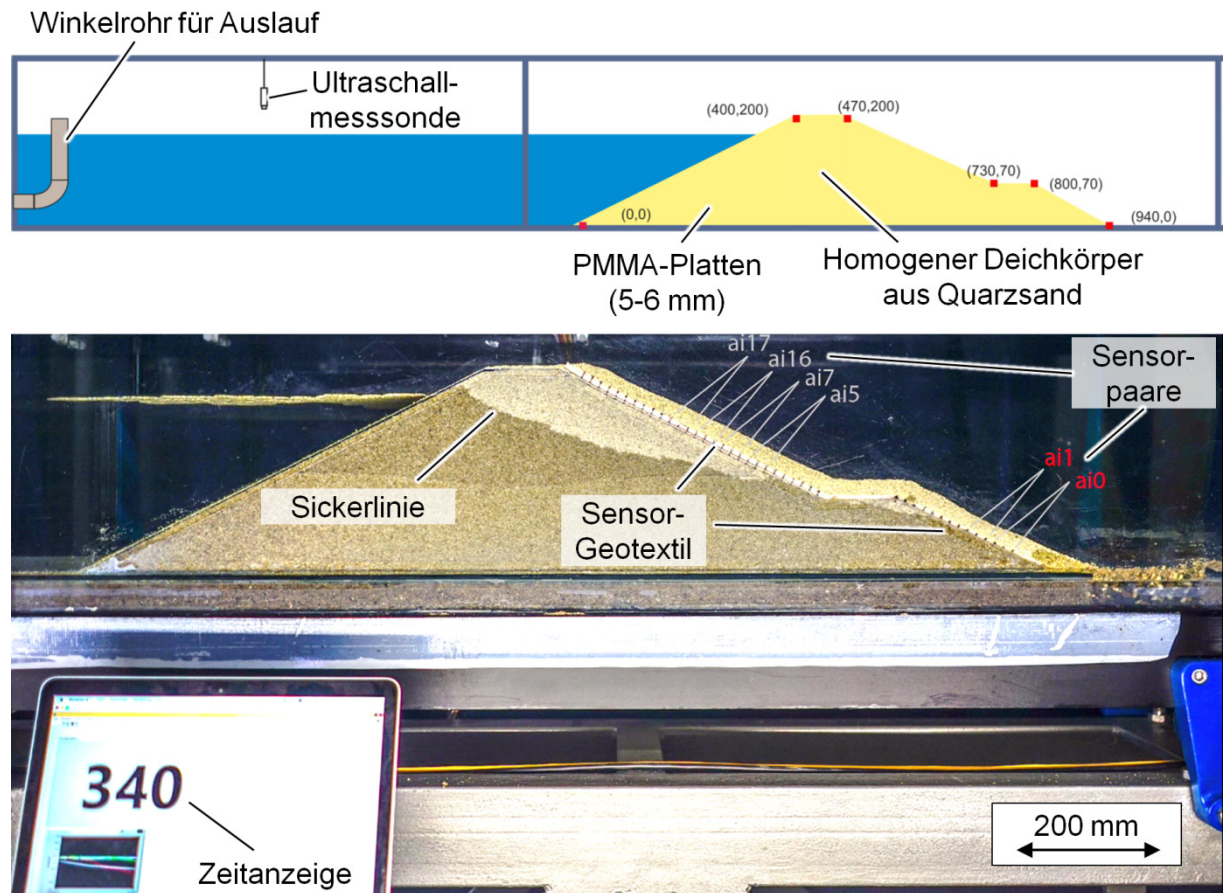


Abbildung 7: Prinzipskizze (oben) und realer Versuchsaufbau (unten) des kleinen Modelldeichs mit eingebautem Sensor-Geotextil; alle Angaben in mm.

Im zeitlichen Spannungsverlauf (Abbildung 8) wird deutlich, wie die Sensorkanäle nacheinander auf den steigenden Wasserstand reagieren. Aufgrund des Durchsickerns des Wassers durch den Sand kommt es zeitverzögert zum Herabsetzen des elektrischen Widerstands innerhalb der Sensorpaare. Dadurch kommt es zum Spannungsabfall. Am unteren Teil der Deichböschung fällt Spannung an den Kanälen ai0 und ai1 zeitlich aufgrund des Sickerlinienverlaufs ab. Im oberen Teil des Deiches ist der vertikale Anstieg der Sickerlinie mit einer größeren Zeitverzögerung verbunden. Die Spannungen an den Sensorpaaren ai5, ai7, ai16 und ai17 fallen nacheinander ab. Der Versuch zeigt, dass die Machbarkeit der Feuchtigkeitsdetektion mit einem Sensor-Geotextil gegeben ist.

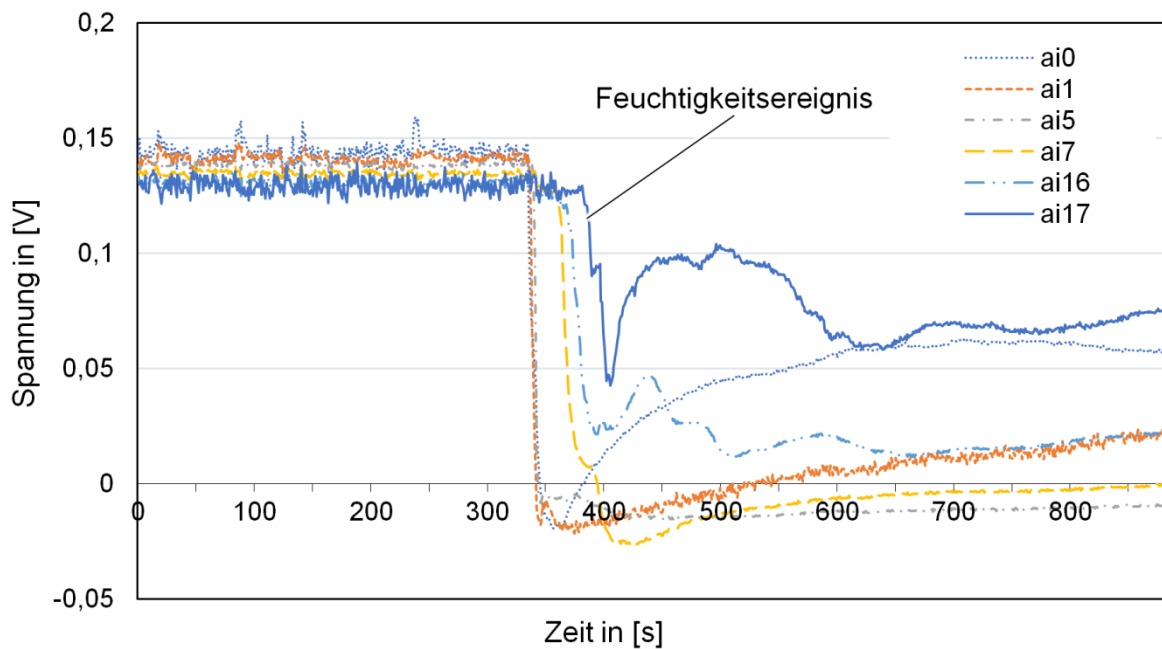


Abbildung 8: Zeitlicher Spannungsverlauf an den Sensorpaaren im kleinmaßstäblichen Modelldeich bei ansteigendem Wasserstand.

4 Entwicklung eines intelligenten Geotextils

Die Anforderungen an die Sensorik zur Feuchtigkeitsmessung im Deich wurden zusammen mit dem *IWW* ausgearbeitet und sind nachfolgend aufgelistet.

Parallele Sensorablage

Die entwickelten Sensoren sollen parallel und waagrecht zur Deichkante bzw. Wasserstandshöhe verlaufen. Dabei setzt sich eine Messstelle aus einem Sensorpaar, das wiederum aus zwei einzelnen Sensoren besteht, zusammen. Diese müssen auch zueinander möglichst durchgehend den gleichen Abstand haben, um eine gute Messgenauigkeit zu gewährleisten. Maßgeblich für die Auflösung des Feuchtigkeitsgehalts im Deich ist die Anzahl und Anordnung der Sensorpaare auf der Deichinnenseite. Aufgrund der konstanten Abschrägung der Böschungsseite im Deichbau ist dabei ein gleichmäßiger Abstand zu gewährleisten.

Kompaktheit der Sensorfaser

Für den Einsatz von Carbonfasern für die Feuchtigkeitsmessung ist die Ablagebreite des Faserbündels (hier: Kompaktheit) wichtig für die elektrische Stabilität des Signals. Eine geringe Ablagebreite erhöht zum einen die Kontaktfläche der Filamente zueinander, so dass ein gleichmäßig geringer Kontaktwiderstand der Filamente vorliegt. Zum anderen ist der Abstand zum nächsten Roving bei einer schmalen Ablagebreite definierter, da der Abstand zwischen dem äußersten und dem innersten Filament zu dem freien Abstand zwischen den Rovings hinzugefügt wird und sich je nach Filament unterschiedlich ausprägt.

Kaschierung der Sensorfaser

Das eingesetzte Textilverfahren kann durch zusätzliche Wirk- oder Stickfäden die Multifilamente des Sensorgarns schützen. Dabei spielt der Abstand des Fadens (bzw. die Wiederholung der Abbindung pro laufenden Meter) maßgeblich eine Rolle. Je geringer dieser gewählt wird, desto mehr ist die Sensorfaser durch den zusätzlichen Faden geschützt.

Weiterhin können dünn aufgetragene, elektrisch leitfähige Polymerbeschichtungen für Carbonfasern dazu beitragen, dass die Carbonfasern durch Partikel wie z. B. Sandkörner nicht beschädigt werden. Die Polymerbeschichtung verhindert zudem, dass sich einzelne Carbonfasern lösen und zwischen den Sensorpaaren zu Kurzschlüssen führen. Ferner können Textilien – sogenannte Klebevliese – als nachträgliche Kaschierung auf die Sensorfasern aufgetragen werden.

4.1 Textile Fügeverfahren für die Herstellung von Sensortextilien

Fügeverfahren werden in der DIN 8580 als vierte Hauptgruppe folgendermaßen definiert: das „auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff; dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt.“ (DIN 2003, S. 5).

Eine mögliche Einteilung der Fügeverfahren nach ausgewählten Kriterien kann anhand Abbildung 9 getroffen werden (Gries 2015).

Bindungsprinzip	
Formschluss	nähen/sticken Kurzwaren
Kraftschluss	tuften vernadeln
Adhäsion	kleben
Stoffschluss	schweißen (thermisch)

Abbildung 9: Einteilung der Fügeverfahren nach (Gries 2015).

Im Folgenden werden die Fügetechniken näher beschrieben, die für das Projekt grundsätzlich anwendbar sind.

4.1.1 Schweißen

Unter Schweißen versteht man das Verbinden von gleichen oder verschiedenen Materialien. Dabei werden die Materialien unter Wärme und/oder Druck, mit oder ohne Schweißzusatzwerkstoffe gefügt. Die Qualität der Verbindung wird durch Druck, Temperatur und Erwärmungszeit vorgegeben. Der Vorteil des Schweißens gegenüber dem Kleben oder dem Nähen/Sticken ist, dass eine homogene Verbindung ohne weitere Zusatzstoffe erzeugt werden kann.

Durch Energiezufuhr in der Fügezone werden die Füge Teile in den schmelzflüssigen Zustand überführt und gefügt. Durch die Verknäuelung der Molekülketten der thermoplastischen Füge Teile in der Grenzfläche wird eine stoffschlüssige Verbindung erreicht. Um diesen Zustand zu erreichen, stehen verschiedene Prozesse zur Auswahl.

In der klassischen Textilkonfektion kommen dafür folgende Schweißverfahren zum Einsatz:

- Heizkeilschweißen
- Heißluftschweißen
- Tapeschweißen
- Hochfrequenzschweißen
- Ultraschallschweißen

Beim Heizkeil-, Heißluft- und Tapeschweißen werden die Fügepartner direkt durch Festkörper oder durch heiße Luft erhitzt. Das Tapeschweißen stellt eine Variante des Heißluftschweißens dar, bei dem ein zusätzliches Tape, z. B. zum Abdichten von Nähten zugeführt wird. Bei den genannten Verfahren sind die Fügepartner unabhängig von der Materialzusammensetzung, während das Hochfrequenz- und das Ultraschallschweißen nur bei thermoplastischen Werkstoffen mit entsprechendem Dämpfungsverhalten durchgeführt werden können (Gries 2015).

4.1.2 Kleben

Kleben ist das Fügen unter Verwendung eines Klebstoffes, d. h. eines nichtmetallischen Werkstoffes, der Fügepartner durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann. Adhäsion umfasst die Haftkräfte an den Kontaktflächen zweier unterschiedlicher oder gleicher Stoffe durch Molekularkräfte. Die adhäsionbildenden Wechselwirkungen zwischen Klebstoff und Fügepartneroberfläche haben mit weniger als 1 nm eine nur äußerst geringe Reichweite. Deshalb ist eine gute Benetzung der Fügepartner durch den noch nicht verfestigten, also flüssigen Klebstoff, eine notwendige Voraussetzung für die Herstellung einer qualitativ hochwertigen Klebung. Mit zunehmender Verfestigung des Klebstoffs steigt dessen innere Festigkeit, die Kohäsion, an. Das Kleben ist in zwei Gruppen unterteilt. Auf der einen Seite gibt es das Kleben mit physikalisch abbindenden Klebstoffen, d. h. Klebstoffe, die durch Abkühlen oder Verdunsten abbinden. Auf der anderen Seite gibt es das Kleben mit chemisch abbindenden Klebstoffen. Hierbei führt eine chemische Reaktion, z. B. Vernetzen, zum Abbinden (Cherif 2011).

4.1.3 Textiles Fügen durch das Stickverfahren

Textiles Fügen umfasst alle Fertigungsverfahren, die das Fügen von und mit textilen Werkstoffen implizieren. Dazu gehören das Herstellen von Fäden aus textilen Fasern, deren Weiterverarbeitung zu textilen Flächengebilden und das Nähen mit verschiedenen textilen Werkstoffen. Beim Stickgen wird ein Roving mittels eines Stickgarns, das durch einen Stickgrund gezogen wird, auf dem Stickgrund befestigt. Für das Aufbringen der Sensorstruktur wird das Tailored Fibre Placement (TFP) verwendet, ein Stickverfahren zur Funktionalisierung und Verstärkung von Textilien. Bei diesem Verfahren wird über ein Ober- und Unterfadensystem ein Doppelsteppstich gebildet. In einem dritten Fadensystem wird ein weiteres Garn, in diesem Fall die Sensorfaser, abgelegt (siehe Abbildung 10). Durch dieses Verfahren lassen sich die Sensorfasern gestreckt auf der Oberfläche ablegen und in der gewünschten Position fixieren. Typischerweise werden hier Vliese als Stickgrund vorgespannt eingesetzt (Cherif 2011).

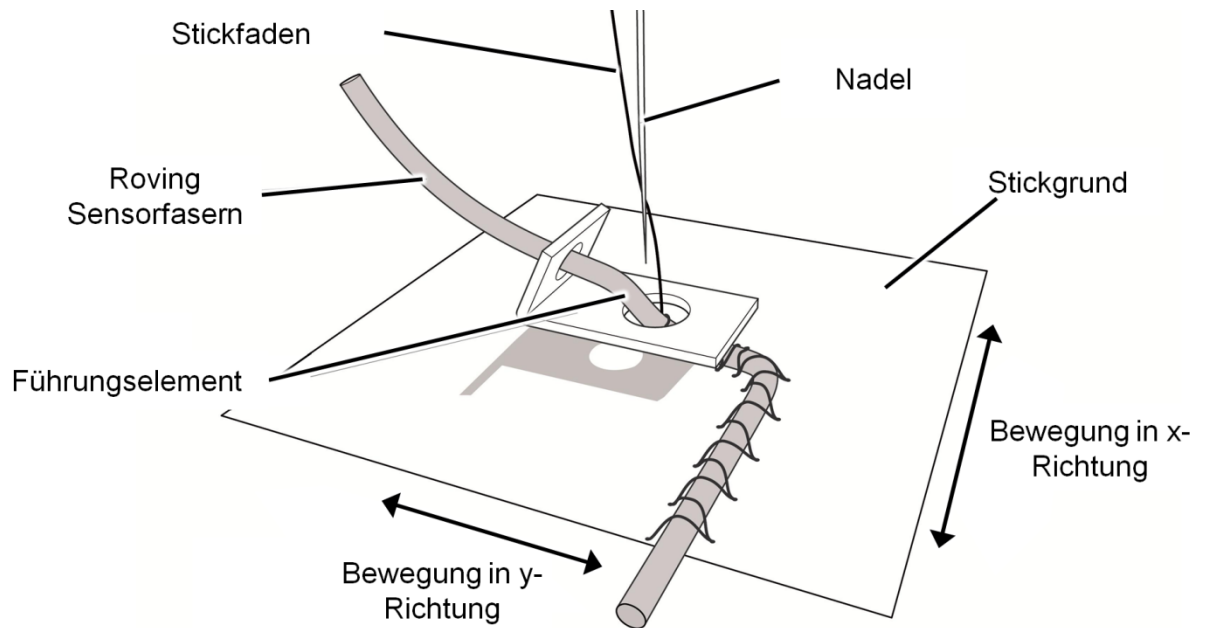


Abbildung 10: Prinzip des TFP-Stickverfahrens zum Ablegen von Sensorfasern nach (Eichhoff 2011).

Beim TFP-Verfahren gibt es unterschiedliche Typen von Stickmustern, die als Zick-Zack-Doppelsteppstich realisiert werden können (Abbildung 11). Aufgrund anderer Legetechnologien mit Carbonfasern oder Drähten, ist der Stichtyp 5 bevorzugt. Er weist gegenüber Stichtyp 3 einen deutlich geringeren Fadenverbrauch sowie höhere Produktivität auf und wird daher hier weiter betrachtet.

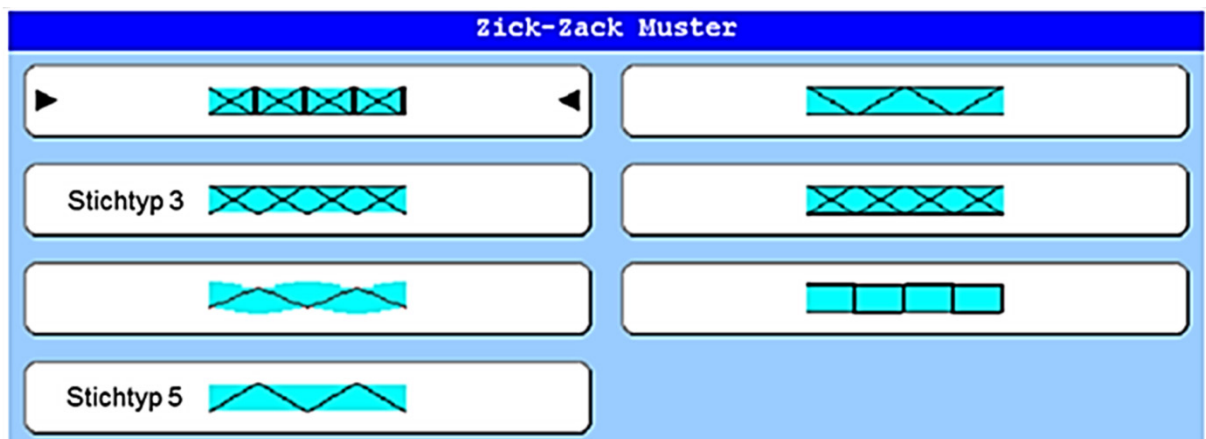


Abbildung 11: Auszug der verfügbaren Stichtypen der Stichparameter.

Wesentlich größeren Einfluss auf Kompaktheit, Fixierung und Produktionsgeschwindigkeit für die Sensorfaser-Ablage haben die Parameter Stichabstand, Stichweite (Hub) und Stickgeschwindigkeit (siehe Abbildung 12).

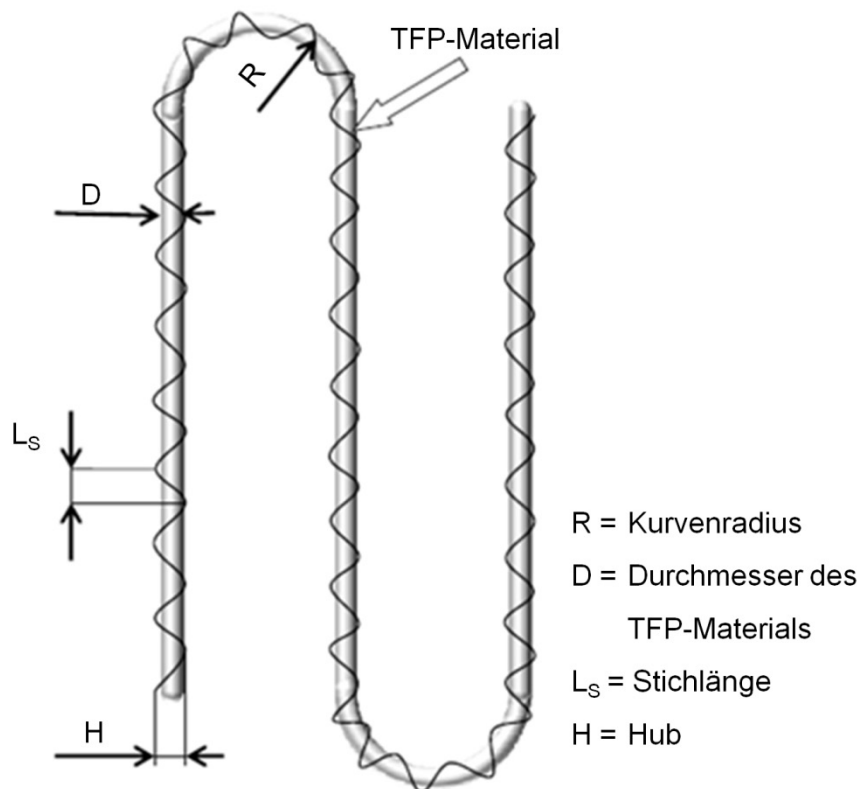


Abbildung 12: Wichtigste Parameter bei der TFP-Sticktechnologie.

Der Stichabstand gibt dabei die Genauigkeit und Festigkeit der Fadenfixierung sowie die Kaschierung durch den Stickfaden vor. Dieser Parameter ist maßgeblich für die resultierende Produktionsgeschwindigkeit. Die Stichweite (auch Hub genannt) sorgt vor allem für die Kompaktheit der Faserbündel. Dieser Hub sollte so gering wie möglich sein. Dabei muss er eine Mindestablegebreite vorweisen, um alle Filamente im Faserbündel vollständig zu umschließen. Ansonsten kommt es zum Faserspliss. In Versuchen wurde ein Hub zwischen 2 und 5 mm ermittelt. Die Produktionsgeschwindigkeit gibt nicht nur die Prozessdauer vor, sondern hat auch einen Einfluss auf die Qualität des Stickbildes. Üblicherweise wird beim TFP-Verfahren je nach Maschinentyp mit einer Drehzahl von 400 bis 600 U/min gestickt. Dies entspricht der Anzahl an Stichen pro Minute.

4.2 Herstellung eines Sensor-Geotextils

Für die Messungen am großmaßstäblichen Modelldeich am *IWW* wurden die Messvliese III und IV am *ITA* entwickelt. Im folgenden Kapitel werden die Herstellungsverfahren vorgestellt, die zum Einsatz kamen.

4.2.1 Beschichtung der Carbonfasern

Grundlage für das intelligente Geotextil ist Vliesstoff aus Polyester/Polypropylen mit 4,5 mm Dicke und 650 g/m² Flächengewicht, welches auch für den Aufbau des Modelldeiches am *IWW* verwendet wird. Für das Messvlies III wurden unbeschichtete verwirkte Biaxialgelege mit Carbon- und Glasfasern hergestellt und aufgebracht. Diese werden hier als Carbon-Glasfaser-Gewirke bezeichnet. Aufgrund der im Verarbeitungsprozess

auftretenden Querkräfte wurden einzelne Filamente aus der Struktur gelöst. Es zeigt sich, dass bereits einzelne Filamente ausreichen, um das Messsignal signifikant zu beeinflussen. Für Messvlies IV wurden in einem weiteren Verarbeitungsschritt auf dem intelligenten Geotextil beschichtete Sensorbahnen aufgebracht. Alle Sensorgarne wurden mittels Signalleitungen mit der Messeinrichtung verbunden. Die Sensorbahnen bestehen aus jeweils zwei Carbonrovings mit einer Feinheit von 1.600 tex. Der spezifische elektrische Widerstand der Carbonfasern beträgt ca. $14 \mu\Omega\text{m}$. Die Carbonfaserbündel sind in einem Abstand von 4 cm in einem Glasfasergewirk mit AR-Glasfasern (Feinheit 1.200 tex) mit PES-Wirkfäden integriert. Das Gewirk dient dazu, die Carbonfasern parallel und äquidistant voneinander zu positionieren. Zusätzlich stellen die Glasfaserrovings einen mechanischen Schutz dar.

Die Beschichtung verhindert, dass einzelne abgebrochene Carbonfilamente die beiden Carbonrovings verbinden und einen Kurzschluss erzeugen. Dafür wird eine zehnprozentige Dispersion von selbstvernetzendem carboxylierten Styrol-Butadien-Copolymeren (SBR-Beschichtung) in einer Beschichtungsanlage (siehe Abbildung 13) aufgetragen. Zwei Walzen entfernen die überschüssige Beschichtung bei einem Druck von $p = 2,8 \text{ bar}$. Die Aushärtung der Beschichtung erfolgt unter einer Zugspannung von 40 N auf das Gewirk in einem 60 cm langen Heizofen. Die Verweildauer zum Trocknen beträgt mindestens 6 min bei $140 \text{ }^\circ\text{C}$. Daraus ergibt sich eine Zuggeschwindigkeit von $0,1 \text{ m/min}$.

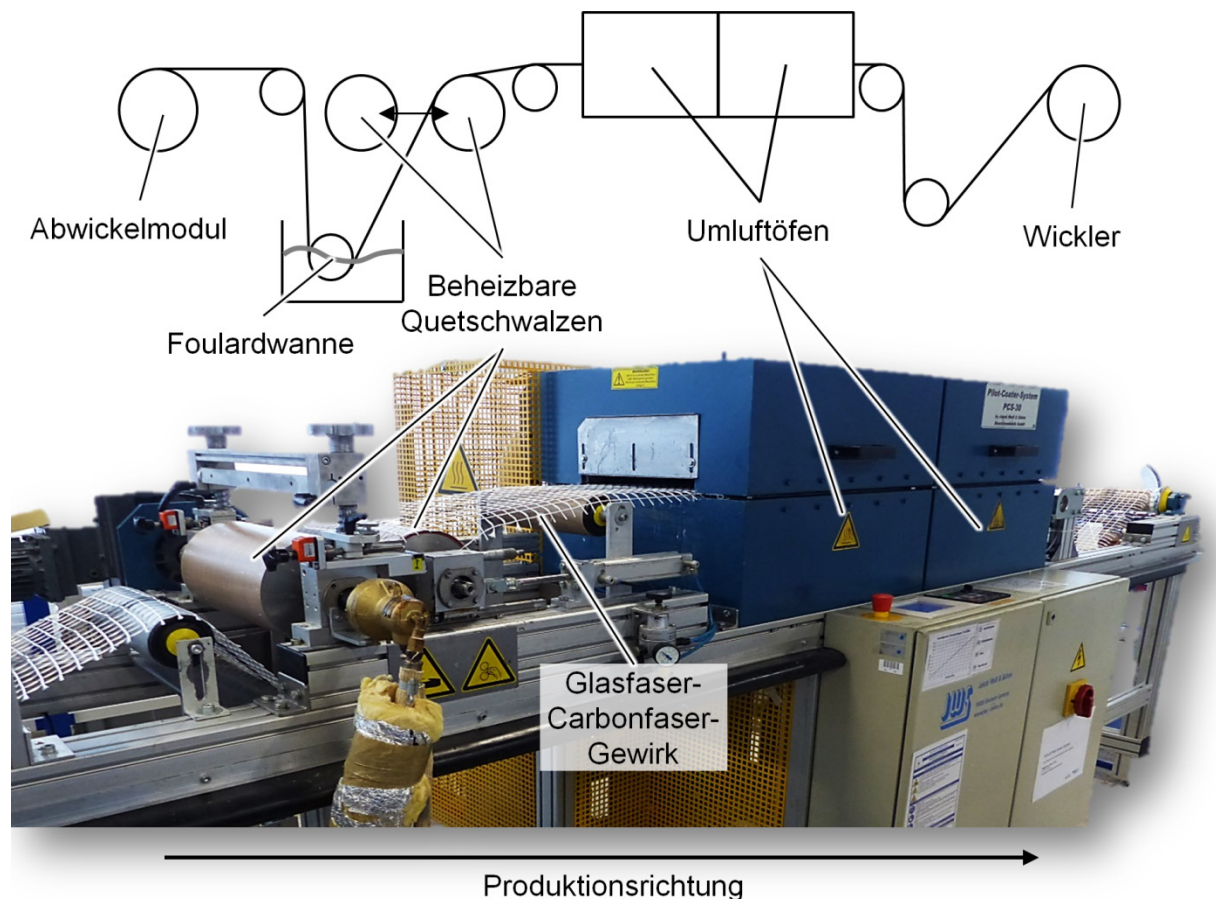


Abbildung 13: Kontinuierliche Tauchbeschichtungsanlage mit Konvektionsofen am ITA.

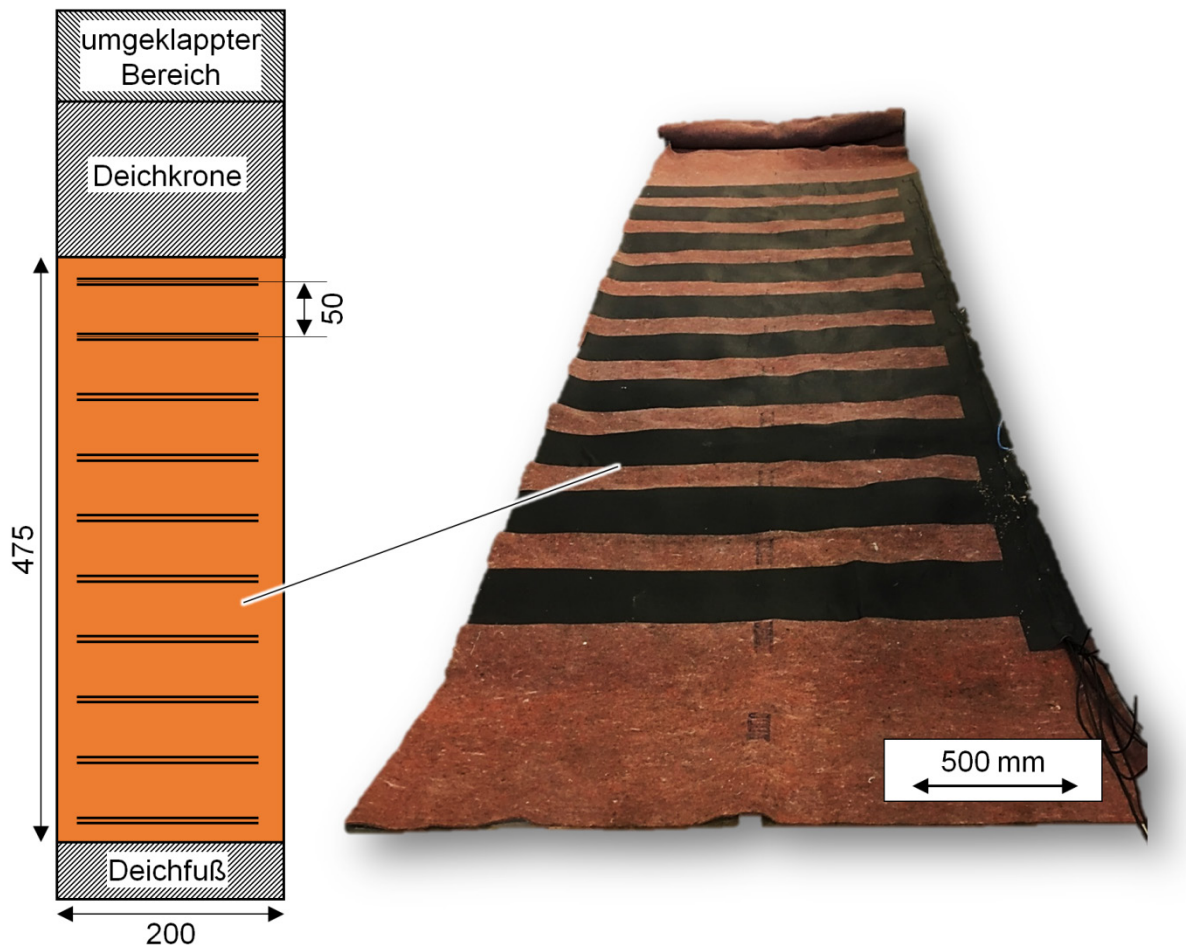


Abbildung 14: Schematischer Aufbau für die Sensorablage (links) im Sensor-Geotextil für die Versuche im Modelldeich, sowie verkabeltes Sensor-Geotextil (rechts).

4.2.2 Aufbringen der Sensorfasern

Entsprechend Abbildung 14 werden die Carbonfaser-Gewirke nach einer Einlauflänge von 2 m im Abstand von jeweils 50 cm mittels Bindervlies aufgebracht. Dieses wird durch Hitze einwirkung bei ca. 115 °C aufgeschmolzen und verbindet nach Abkühlen das Gewirk mit dem Vlies. Zum Schutz der Sensorbahnen vor Kies und scharfkantigen Steinen werden die Bahnen nach dem Kontaktieren mit einem Bindervlies kaschiert (siehe Abbildung 15).

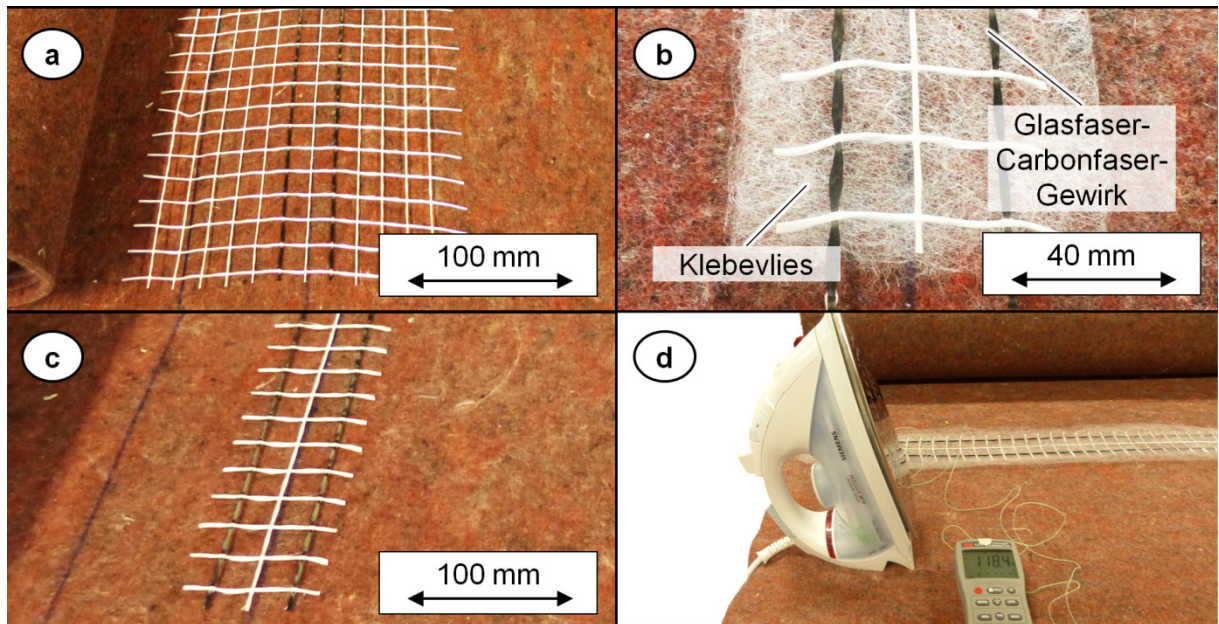


Abbildung 15: Verarbeitungsschritte zum Aufbringen der Gewirkstruktur.

Die Carbonrovings sind mit Aderendhülsen durch eine Crimpverbindung formschlüssig verbunden und anschließend mit 3-polig abgeschirmten Kabeln auf die Aderendhülsen gelötet (siehe Abbildung 16). Die Verwendung von 3-poligen XLR-Kabeln bringt die Vorteile einer hohen Robustheit und einer guten Abschirmung mit sich. Die Isolierung der Lötverbindungen ist durch Einbettung in ein additionsvernetztes Silikon umgesetzt. Aufgrund der geringen Verarbeitungsviskosität von $\eta = 8\text{-}10\text{ Pa}\cdot\text{s}$ wurden Silikonplatten als Fließbarrieren während der Verarbeitung eingesetzt.

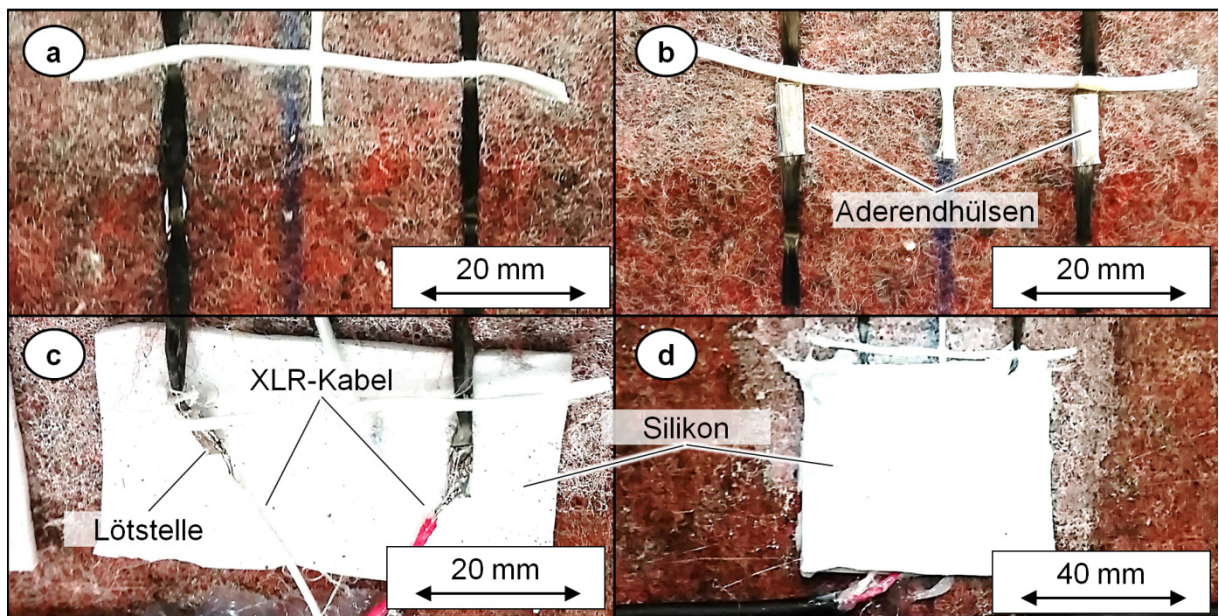


Abbildung 16: Kontaktierung der Carbonfaserbündel (a) durch Aufbringen von Aderendhülsen (b), Anlöten des XLR-Kabels (c) und Isolierung durch Einbettung in Silikon (d).

Im Rahmen der Sensor-Geotextilherstellung wurden auch einzelne Carbonfaserbündel beschichtet und auf Stickmaschinen mittels des zuvor beschriebenen TFP-Stickverfahrens aufgebracht. Um die Beschichtungsgeschwindigkeit bei dennoch gleicher Verweildauer im

Ofen zu erhöhen, wurden die Carbonfasern im Ofen umgelenkt und damit die Strecke im Ofen vervielfacht (Abbildung 17). Die beschichteten Carbonfasern wurden auf einer Mehrkopfstickmaschine vom Typ „CZCW 0800-900D-1500“ bei der Firma *ZSK Stickmaschinen GmbH, Krefeld* aufgestickt. Als Substrat wurde ein Polypropylen-Geotextil mit der Schichtdicke 3 mm der *Huesker Synthetic GmbH, Gescher*, verwendet. Da bestickte Geotextil wurde jedoch nicht im großmaßstäblichen Modelldeich eingesetzt und nicht validiert.

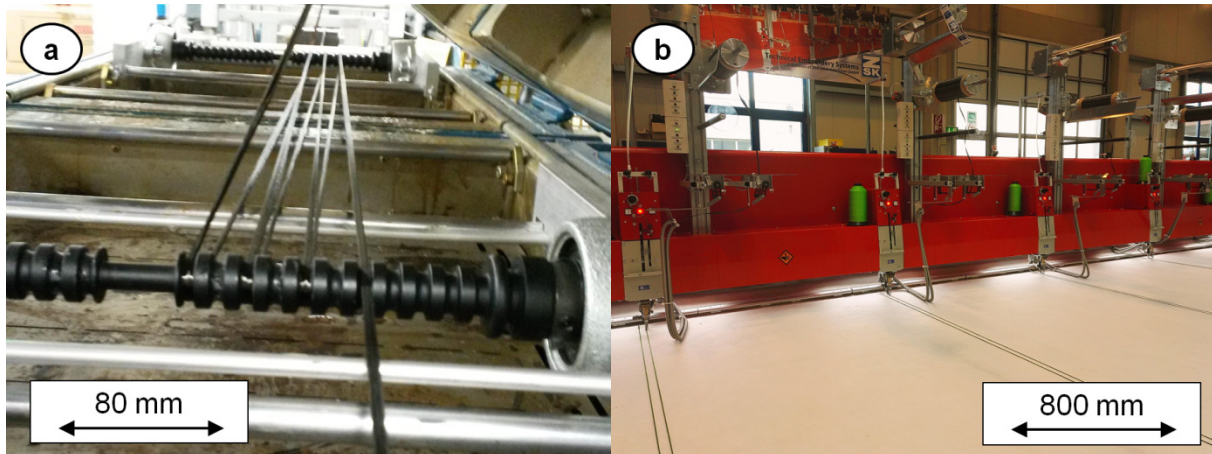


Abbildung 17: Umlenkung der Carbonfaserbündel im Ofen nach der Beschichtung (a) und TFP-Sticken der Sensorfaser auf 8-Kopfstickmaschine (b) bei *ZSK Stickmaschinen GmbH, Krefeld*.

5 Aufbau der Messkette für das Sensor-Geotextil am Modelldeich

Die Feuchtigkeitsversuche wurden am großmaßstäblichen Modelldeich des *IWW* durchgeführt. Dabei wurde das Geotextil in den Modelldeich eingebaut. Die Messkette ist in einer Modulbauweise aufgebaut, um je nach Messaufbau unterschiedliche Konfigurationen sowie den einfachen Austausch einzelner Module zu ermöglichen. Als Messperipherie kam zunächst ein A/D-Wandler vom Typ NI 9205 der Firma *National Instruments, USA*, zur Messung der Spannungen sowie die dazugehörige Messsoftware LabView zum Einsatz. Der A/D-Wandler wurde bei den Langzeitversuchen durch einen 16-Kanal Arduino A/D-Wandler ersetzt. Die Daten werden an den Sensorknoten (Libelium) weitergeleitet und anschließend an das GeoPortal übermittelt, das vom *gia* entwickelt wurde und in Herlé et al. (2018) beschrieben ist. Die Gleich- bzw. Wechselspannung zur Feuchtigkeitsmessung wird durch eine externe Spannungsquelle in die Messschaltung eingespeist. Die verwendete Messkette ist in Abbildung 18 zu sehen.

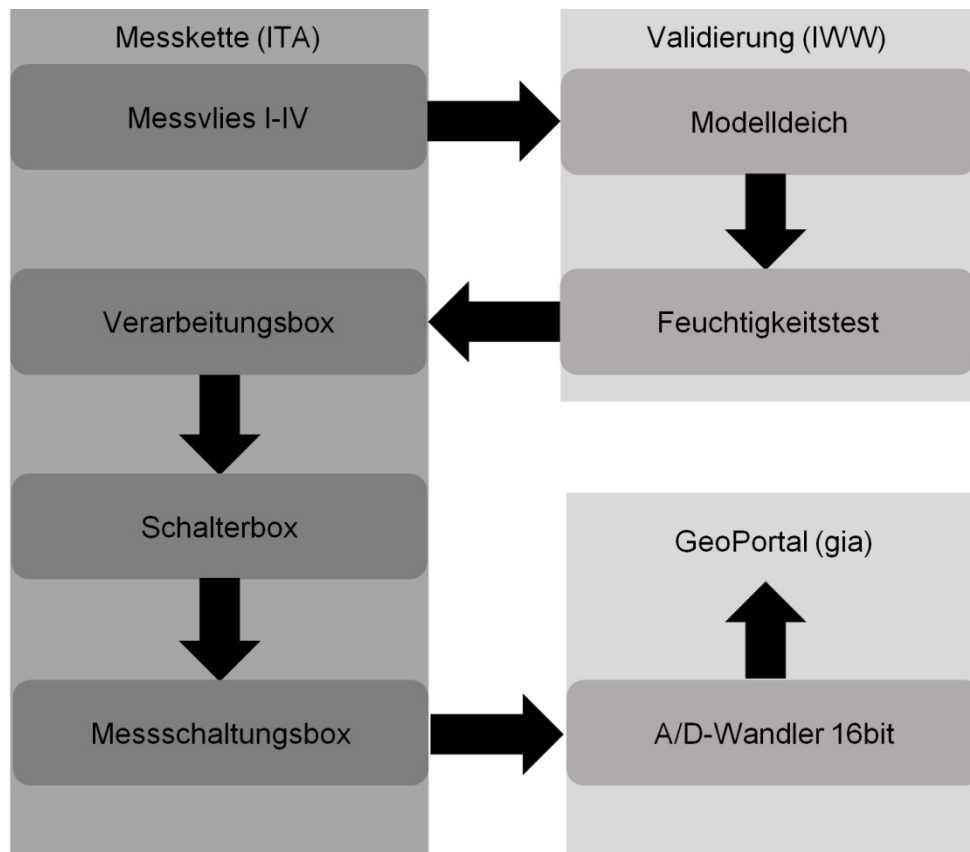


Abbildung 18: Messkette zur Versuchsreihe am Modelldamm.

5.1 Entwicklung der Sensorschaltung

Zur Messung von Feuchtigkeitsereignissen, ist es notwendig, die Sensorpaare im intelligenten Geotextil zum einen mit elektrischem Strom zu versorgen und gleichzeitig Änderungen im elektrischen Widerstand zu messen. Dafür wurde im Rahmen des Projekt *EarlyDike* eine Sensorschaltung entwickelt, deren Grundlagen und Herstellung in den folgenden Kapiteln näher beschrieben wird.

5.1.1 Gleichstrommessung

Eine Gleichstromquelle mit einer Stromstärke von $10\ \mu\text{A}$ wird dazu genutzt, eine Spannung über dem Referenzwiderstand zu erzeugen. Der Referenzwiderstand R_{Ref} hat einen Widerstand von $15\ \text{k}\Omega$. Diese Größe wurde experimentell an den Widerstand des Wassers R_W (siehe rechte Seite der Abbildung 4, nasser Zustand) angenähert und so gewählt, dass sie um ein Vielfaches höher liegt, sodass $R_W < R_{Ref}$ gilt. Nach dem ohmschen Gesetz gilt für die resultierende Spannung über dem Referenzwiderstand $U = I \cdot R$ und damit $U = 10\ \mu\text{A} \cdot 15\ \text{k}\Omega = 150\ \text{mV}$. Diese Spannung wird dann mittels eines Sensors aufgenommen und ausgewertet.

Ohne Wasserkontakt fließt dabei durch die Carbonrovings kein Strom. Erweitert man diese Anordnung nun um einen zweiten Kanal, werden die Kanäle durch einen weiteren Widerstand voneinander getrennt (Abbildung 19) und seriell miteinander verschaltet. Die

rechte Hälfte von Abbildung 4 zeigt das Funktionsprinzip eines Kanals mit Gleichstromquelle als Basis. Hier kommt zur Schaltskizze des trockenen Zustandes der Widerstand R_W hinzu. Dies führt zu einer Parallelschaltung von Widerständen, nach welcher der Gesamtwiderstand immer geringer ist als die jeweiligen Einzelwiderstände. Die Regel für die Berechnung des parallelen Widerstands lautet:

$$R_{gesamt} = \frac{R_{Ref} \cdot R_W}{R_{Ref} + R_W} \tag{1}$$

Es ergibt sich ein Gesamtwiderstand von 7,5 kΩ im nassen Zustand, wenn der Wasserwiderstand genauso groß ist wie der Referenzwiderstand. Da insgesamt der Strom von 10 μA durch den Kanal fließt, beträgt die gemessene Spannung in diesem Fall 75 mV. Vereinfacht existieren somit nur zwei definierte Zustände, nass und trocken, welche sich anhand des gemessenen Spannungsniveaus unterscheiden lassen. In der Praxis führt dieses Messprinzip zu einer Elektrolyse des Wassers, welche ein wesentliches Problem darstellt.

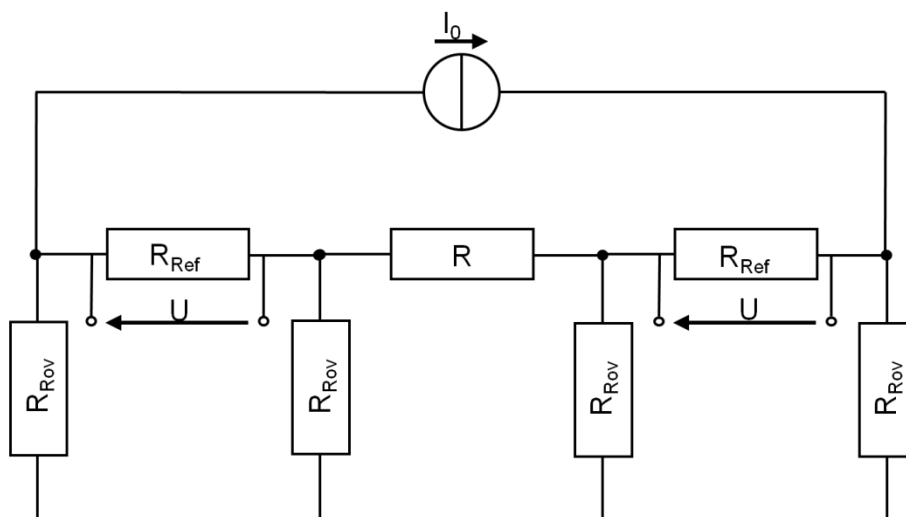


Abbildung 19: Ersatzschaltbild zweier getrennter Kanäle in der Messschaltung mit Gleichstromquelle.

Die Messung des Wasserstands ist mit der gegebenen Schaltung nicht möglich. Die Elektrolyse zwischen den Carbonrovings führt dazu, dass sich im Wasser nicht nur ein Widerstand bildet, sondern auch eine Kapazität. Diese entsteht durch eine Ladungstrennung der Wassermoleküle aufgrund der Verwendung von Gleichstrom. In den Ergebnissen macht sich dies durch ein sofortiges Abfallen der Spannung bei Wasserkontakt der Carbonrovings auf den Nullwert deutlich, woraufhin die Spannung dann langsam in einer logarithmischen Kurve gegen einen festen Spannungswert ungleich dem Nullwert strebt. Bei manchen Kanälen schwankt die Spannung um den Nullwert und bei anderen ist ein konstanter negativer Wert festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Strom im nassen Vlies nicht notwendigerweise in eine Richtung fließt und es somit in den Kanälen auch Rückströme geben kann, welche zu negativen Spannungen führen.

Ein Vergrößern der Abstände zwischen den Faserpaaren, führt zu keinen wesentlichen Verbesserungen. Die Messung mit Gleichstrom ist somit unzureichend, da es zur Ausbildung einer Kapazität durch Ladungstrennung kommt. Die Lösung ist somit die Umsetzung einer neuen Messelektronik, bei der Wechselstrom/-spannung als Eingangssignal verwendet werden kann.

Bei einer Wechselspannungsquelle ist die Nutzung der vorherigen Platine (Gleichstromquelle) nicht möglich. Dort liegt eine serielle Verschaltung der Kanäle vor. Bei einer neuen Platine müssen die Kanäle parallel verschaltet sein. In einer seriellen Schaltung findet eine Spannungsverteilung statt, sobald nasse Kanäle vorhanden sind. Eine Unterscheidung zwischen den Zuständen nass und trocken ist demnach nicht mehr möglich.

Das Ziel der Spannungsmessung ist die Diskreditierung zweier Zustände, bzw. Messwerte. Das heißt, es gibt einen definierten konstanten, positiven Spannungswert der als Zustand trocken definiert wird und einen Zustand mit dem Nullwert, welcher als Zustand nass festgelegt wird.

5.1.2 Gleichspannungsmessung

Um den Einfluss des Messprinzips auf die Signalstabilität der eingesetzten faserbasierten Sensoren zu bewerten, wurde die elektrische Schaltung zur Bestimmung der Sensorfeuchtigkeit auf das Messprinzip der Gleichspannungsmessung erweitert. Bei der bisherigen Messmethode – basierend auf Gleichstrom – kommt es zur Ladungstrennung und damit zur Elektrolyse. Zur Kompensation wurden gleichzeitig Versuche mit einer Gleichspannungsquelle durchgeführt. Bei letzterem Ansatz wird nicht mehr die Stromstärke konstant gehalten, sondern die Spannung. Im Gegensatz zur Gleichstrommessung wird nicht mehr die Spannung über dem Referenzwiderstand gemessen, sondern über die Messbrücke, wie im Ersatzschaltbild in Abbildung 20 dargestellt. Bei Wasserkontakt verringert sich der Widerstand R_W zwischen den Carbonfaserrovings R_{Rov} , sodass die Spannung signifikant abfällt. Zur Verringerung von Messartefakten in den weiteren Kanälen der Sensorpaare ist ein Referenzwiderstand R_{Ref} parallelgeschaltet. Weitere Kanäle sind in der gleichen Konfiguration aus Widerstand für Lastausgleich R_{Last} und Rovingpaar parallel hinzugefügt. Die Widerstände in der Auswertungsperipherie sind um einige Größenordnungen höher als der Widerstand im Wasser gewählt, sodass dieser im Gegensatz zur Schaltung mit Gleichstrom als widerstandslose Verbindung vereinfacht werden kann ($R_W \ll R_{Ref} = R_{Last}$).

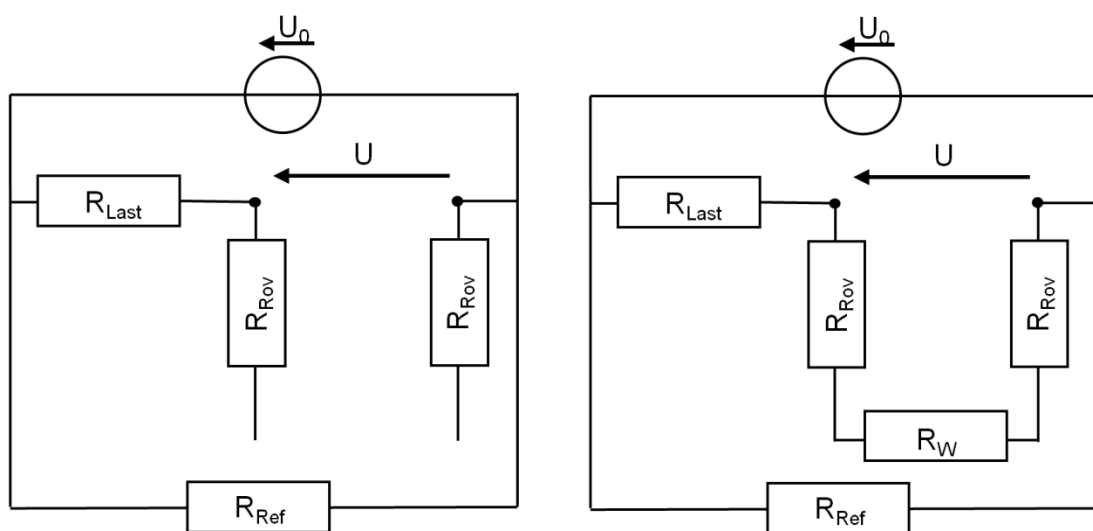


Abbildung 20: Ersatzschaltbild eines Kanals in der Messschaltung mit Gleichspannungsquelle (links trocken und rechts im nassen Zustand).

5.2 Assemblierung der Messkette

Im gesamten Messaufbau werden nur Boxen benutzt, welche die IP-Schutzklasse 67 erfüllen, da die Boxen für den Modelldeichversuch sowohl staub- als auch wasserundurchlässig sein müssen. Die Messkette ist modular aufgebaut und die Boxen sind untereinander durch 24-polige Sub-D-Kabel verbunden. Damit können Boxen auch explizit in die Messkette integriert oder aus der Messkette entnommen werden. Der Messkettenaufbau ist in Abbildung 21 dargestellt.

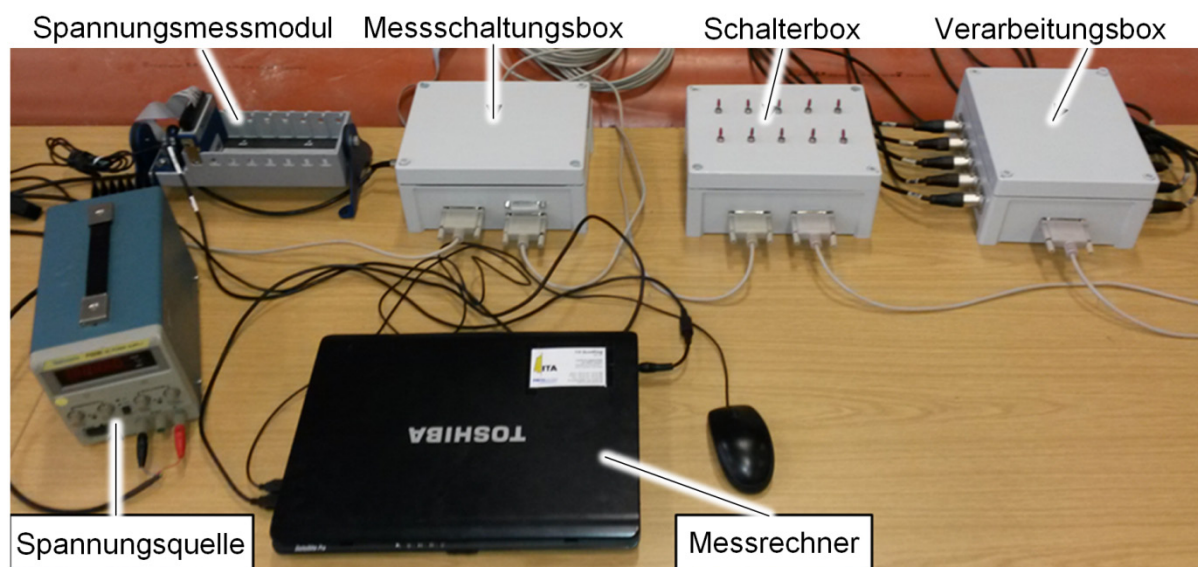


Abbildung 21: Messaufbau zur Feuchtigkeitsmessung mit LabView-Modul der Firma *National Instruments Corp., Texas, USA* und Messrechner zur Spannungsmessung zwischen den Sensorbahnen.

5.2.1 Verarbeitungsbox

Den Ausgang des kontaktierten Vlieses bilden zehn 3-polige XLR-Stecker. Von den drei Polen sind jeweils nur zwei in Benutzung. Das Signal des Vlieses ist im weiteren Verlauf der Messeinrichtung über Sub-D-Kabel weitergeleitet. Die Funktion der Verarbeitungsbox ist die Signalübertragung der zehn 3-poligen Kabel auf ein 24-poliges Sub-D-Kabel. Die Verbindung in der Box von den Buchsen der 3-poligen Kabel zu der Sub-D-Buchse erfolgt durch Drahtbrücken, welche angelötet sind.

5.2.2 Schalterbox

Im Laufe der Messungen kann es erforderlich sein, einzelne Kanäle des Vlieses abzuschalten, um nur bestimmte Kanäle zu messen oder etwaige Fehler, wie z. B. Beeinflussung der Kanäle untereinander oder gestörte Signale, zu finden und zu beheben. Hierzu werden in der Schalterbox Kippschalter verwendet, die in jeden Kanal eingebracht werden. Die Verbindung von den Sub-D-Buchsen zu den Kippschaltern erfolgt durch drei 8-polige Kabel (siehe Abbildung 21).

5.2.3 Messschaltungsbox

Die Box mit der Messelektronik besitzt einen Eingang für die Signale des Vlieses und zwei Ausgänge für Messsensoren, welche alle über Sub-D-Verbindungen hergestellt werden. Außerdem ist ein Eingang zur Stromversorgung der Platine mit Gleich-/Wechselspannung vorhanden. Die Platine ist mit Abstandshaltern mit Klebesockeln an das Gehäuse der Messschaltungsbox befestigt. Die Verbindung der einzelnen Komponenten in dieser Box erfolgt mit 20-poligen Flachbandkabeln.

6 Auswertung der Messergebnisse

Im folgenden Versuch wurde das Sensor-Geotextil aus Abbildung 14 für einen Nassversuch benutzt. Hierzu wird der in Abbildung 21 gezeigte Messaufbau verwendet. Die einzelnen Sensoren sind über die Verarbeitungsbox und über die Schalterbox an die Messschaltung angeschlossen. An die Messschaltung angeschlossen sind die Spannungsquelle zur Stromversorgung und das Spannungsmessmodul inklusive des Messrechners, welcher zur Datenerfassung benutzt wird. Der Referenzwiderstand R_{Ref} und die Lastwiderstände R_{Last} betragen $15 \text{ k}\Omega$. Der Wasserwiderstand R_W kann innerhalb der Messung mit Hilfe des spezifischen elektrischen Widerstandes von Leitungswasser $\varrho = 2 \cdot 10^7 \text{ }\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ und dem physikalischen Zusammenhang zwischen dem Widerstand und seinen Geometrieparametern

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2)$$

zu $R_W = 225 \text{ }\Omega$ abgeschätzt werden. Die Carbonfaserovingwiderstände sowie die Kabelwiderstände sind durch einen Widerstand $R_{Rov} = 100 \text{ }\Omega$ hinreichend gut abgeschätzt, sodass die Annahme ($R_W \ll R_{Ref} = R_{Last}$) gültig ist. Im Nassversuch werden die verschiedenen Kanäle gezielt nacheinander bewässert und die Spannungen innerhalb eines Kanales differentiell gemessen. Die differentielle Messung der Spannung ist bei großen Leiterlängen zwischen der Spannungsmesseinheit und der Signalquelle bevorzugt zu verwenden. Sowohl die Signalquelle als auch die Spannungsmesseinheit sind mit der Erdungseinheit verbunden, sodass die Erdpotentialdifferenz zwischen der Spannungsquelle und der Spannungsmesseinheit zwischen 0 mV und 100 mV beträgt. Ziel des Versuchs ist es, das veränderte Messprinzip wie auch die einzelnen Komponenten Geotextil und Messschaltung auf ihre Funktionalität zu testen. Außerdem sollen Nebeneffekte wie die gegenseitige Beeinflussung der Sensorpaare erfasst werden. Die Versuchsreihe führt zu den Messergebnissen aus Abbildung 22.

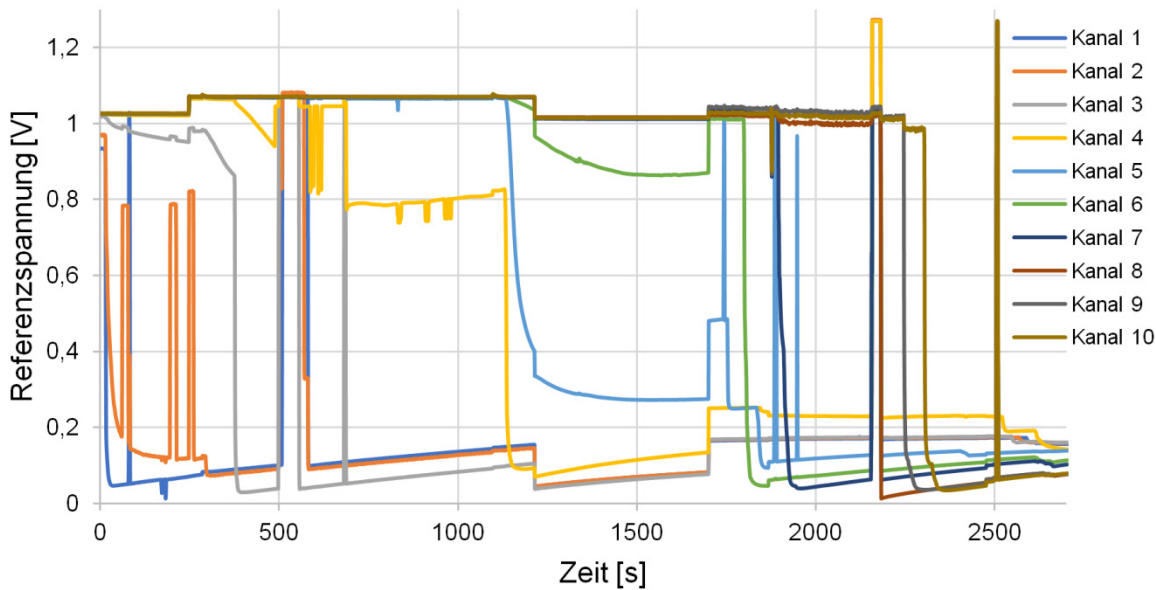


Abbildung 22: Spannungs-Zeitverlauf als Versuchsauswertung zum Nassversuch vom 28.11.17, durchgeführt am IWW.

Auf der Ordinate des Diagramms befindet sich der Quotient aus der am jeweiligen Kanal gemessenen Spannung zur Referenzspannung, welche über die Spannungsquelle auf das Geotextil übertragen wurde. Die Abszisse zeigt die fortlaufende Versuchsdauer in Sekunden. Das Spannungsniveau jedes Kanals fällt zum Zeitpunkt des Wasserkontakts auf einen niedrigen Wert ab. Dieser lässt sich mit dem im Kapitel 5.1 beschriebenen Effekt der Herstellung einer elektrisch leitenden Verbindung durch Wasser zwischen den Sensoren erklären.

Ein solcher Spannungsabfall ist zum Beispiel bei Kanal 4 nach einer Zeit von $t = 1150$ s zu erkennen. Weitere signifikante Anstiege der Spannung am jeweiligen Kanal entstehen durch das Ausschalten des Kanals mit Hilfe der Schalterbox. Dies führt zu einer Spannungsmessung am Kanal auf der Messplatte, wobei die elektrische Verbindung zwischen dem Sensorpaar am Geotextil und dem dazugehörigen Kanal auf der Messschaltung unterbrochen ist (siehe Abbildung 22, Kanal 10, braun, bei $t = 2500$ s). Des Weiteren ist zu erkennen, dass der jeweils letzte trockene Kanal auf ein niedrigeres Spannungsniveau als das Ausgangsniveau abfällt. Während zum Beispiel die Spannung von Kanal 4 aufgrund von Wasserkontakt der zugehörigen Sensoren zum Zeitpunkt $t = 1150$ s abfällt, fällt gleichzeitig auch die Spannung an Kanal 5 auf einen niedrigeren Wert ab. Dieses Phänomen ist aller Voraussicht nach auf einen technischen Fehler zurückzuführen, welcher eine permanente elektrische Verbindung zwischen den Kanälen 1 und 2 zur Folge hat.

6.1 Analyse des Spannungsabfalls am Sensor

Im Folgenden wird das Abfallen der Spannung während der Bewässerung eines Kanals näher beschrieben. Die Bewässerung der einzelnen Kanäle erfolgt jeweils nach 10 s. Der Spannungsabfall, der in der Simulation des in Abbildung 4 gezeigten Ersatzschaltbildes dargestellt ist, ist durch eine Sprungstelle beschrieben. Die Simulationen wurden mit Matlab durchgeführt.

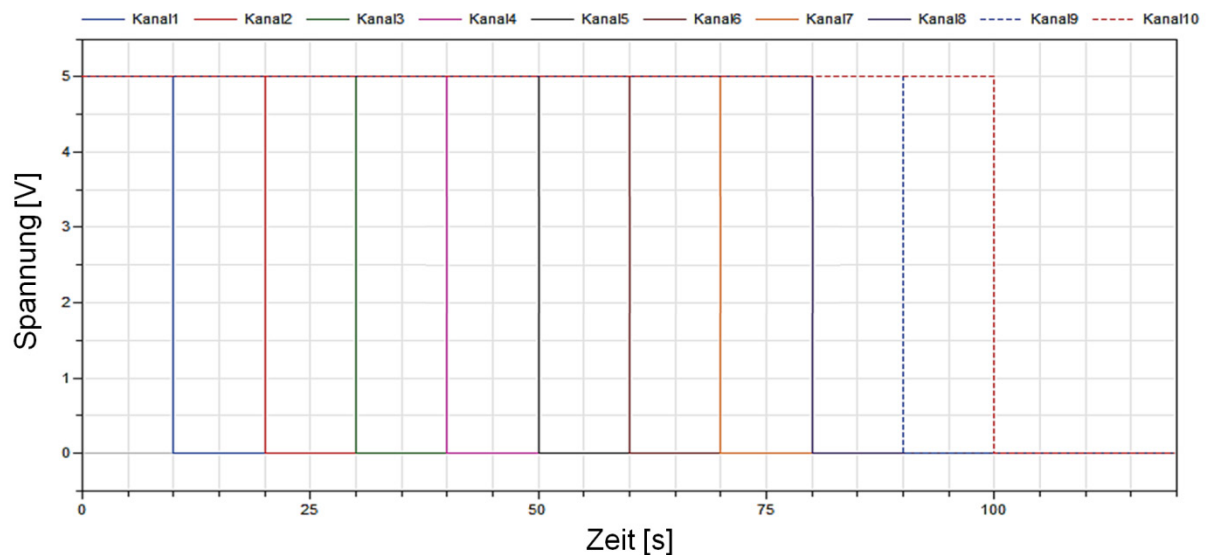


Abbildung 23: Simulation der idealen Messschaltung.

Die realen Messergebnisse zeigen dagegen einen Effekt, welcher durch die Hemmung des Spannungsabfalls bei gleichzeitigem Stromfluss innerhalb des nassen Kanals beschrieben wird. Dieser Effekt ist möglicherweise auf die durch die Verwendung von Gleichspannung entstehende Elektrolyse zurückzuführen. Im nachfolgenden Abschnitt wird dieser Effekt durch eine Spule dargestellt. Das Ersatzschaltbild hierzu ist in Abbildung 24 dargestellt.

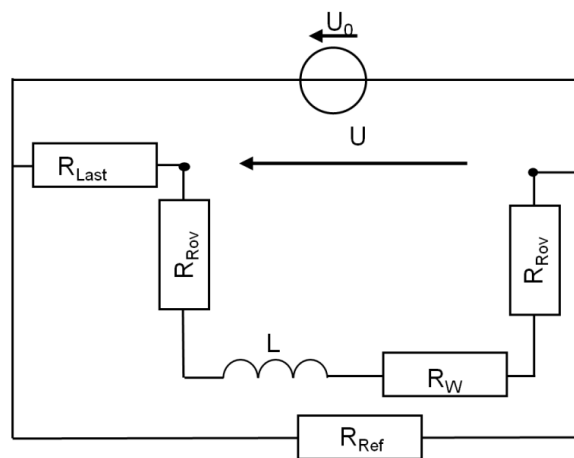


Abbildung 24: Ersatzschaltbild für die Simulation des Spannungsabfalls.

Es gelten die Bauteilgleichungen

$$U_R = RI \quad (3)$$

$$U_L = L \frac{dI}{dt} \quad (4)$$

entsprechend für die Widerstände und für die Spule. Die Differentialgleichung zur Beschreibung der Schaltung

$$IR_{ges} + L \frac{dI}{dt} = U_Q \quad (5)$$

besitzt die eindeutige Lösung.

$$I(t) = \frac{U_Q}{R_{ges}} \left[1 - e^{\left(-\frac{R_{ges}(t-t_0)}{L}\right)} \right]. \tag{6}$$

Die gemessene Spannung wird in diesem Fall durch die Gleichung

$$U(t)_{Mess} = U(t_0) \left(1 - \left(1 - \frac{R_W}{R_{ges}} \right) \left(1 - e^{\left(-\frac{R_{ges}t}{L}\right)} \right) \right) \tag{7}$$

beschrieben und setzt sich aus den Spannungen zusammen, welche auf der Spule L und dem jeweiligen Wasserwiderstand R_W anliegen. Der Gesamtwiderstand R_{ges} setzt sich aus dem Wasserwiderstand R_W den beiden Rovingwiderständen R_{Rov} , welche die durch Kabelleitungen verursachten Widerstände beinhalten, und dem Lastwiderstand R_{Last} zusammen. Für die Simulation sind dieselben Parameter wie in der vorherigen Simulation verwendet worden. Zusätzlich gilt für die Induktivität der Spule $L = 50$ kH. Dieser Wert ist durch Simulationen an die auftretenden Effekte während des Messversuchs angenähert.

Für die Analyse der realen Messergebnisse ist die Zeit $t_{rel} = t - t_0$ zu verwenden, wobei die Zeit t_0 der Zeit zum Beginn des Spannungsabfalls entspricht. Zudem sind die Spannungen auf den Maximalwert der Spannung in diesen Intervallen bezogen

$$U_{rel} = \frac{U(t_{rel})_{Mess}}{U(t=t_0)} \tag{8}$$

Mit dem bereits bekannten Lastwiderstand R_{Last} und den Messdaten kann das Ausgleichsproblem für die Parameter R_W und L nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gelöst werden.

Die Ergebnisse der Berechnungen für die Kanäle 1 und 3 sind in den Abbildungen 25 und 26 dargestellt. Dabei wird erkenntlich, dass die Näherungskurven sich in Bezug auf den Wasserwiderstand R_W lediglich um 5 % unterscheiden. Die Unterschiede in der Induktivität sind jedoch sehr deutlich (260 %). Allerdings ist es möglich, dass sich die Induktivität von Kanal zu Kanal unterscheidet, da andere Leiterlängen der Sensoren, wie auch minimal unterschiedliche Sensorabstände oder Übergangswiderstände an den Kontaktierungen vorliegen können.

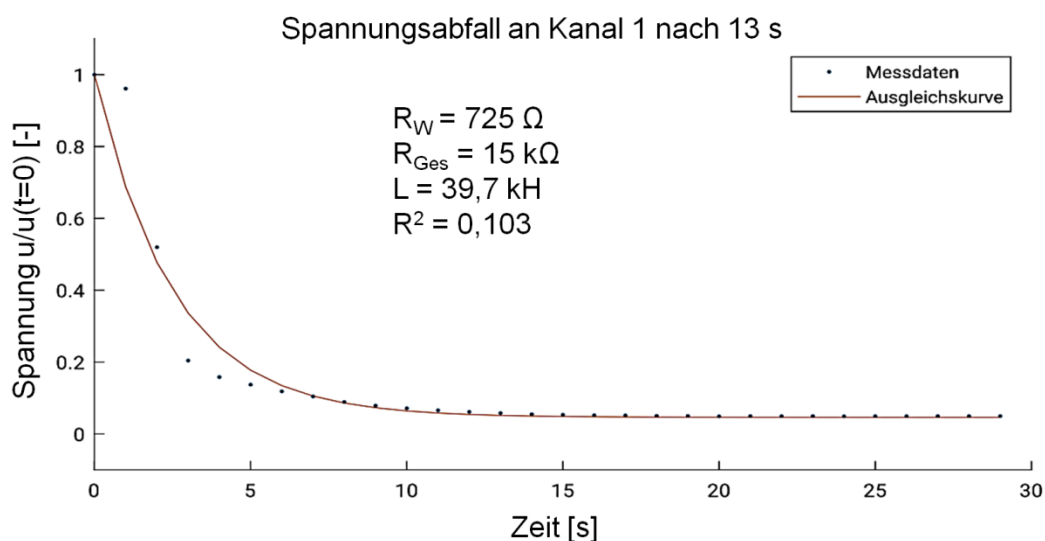


Abbildung 25: Simulation des Spannungsabfalls am Sensorpaar 1 (oben) und Sensorpaar 3 (unten) zu verschiedenen Zeitpunkten.

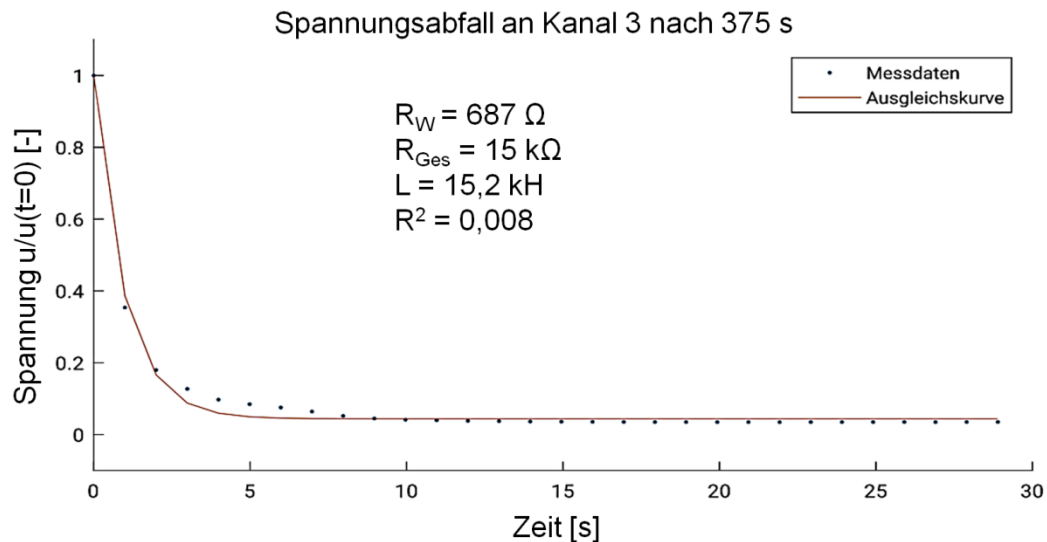


Abbildung 26: Simulation des Spannungsabfalls am Sensorpaar 1 (oben) und Sensorpaar 3 (unten) zu verschiedenen Zeitpunkten.

7 Fazit und Ausblick

Im Arbeitspaket 3 „Deichmonitoring und -simulator“ des BMBF-Projekts *EarlyDike* wurden intelligente Geotextilien zur Echtzeit-Feuchtigkeitsmessung im Deich entwickelt und validiert. Dazu wurden unterschiedliche leitfähige Faserwerkstoffe untersucht und elektrisch leitfähige Carbonfasern als Sensorfasern für den Untersuchungsraum ausgewählt. Weiterhin wurden Integrationskonzepte in bestehende textile Herstellungsverfahren für Geotextilien untersucht und verschiedene Fügeverfahren für die Geotextilien bezüglich der Verbundfestigkeit charakterisiert. Das Messprinzip beruht auf der Korrelation des elektrisch messbaren Signals zweier Sensorfasern und der physischen Umgebungsänderung der Feuchte. Es wurden Langzeitmessungen an einem Modelldeich durchgeführt, in den das intelligente Geotextil auf der Böschungsseite eingebracht ist. Die Versuche zeigen die Eignung der textilbasierten Sensorik sowie der konzipierten Messschaltung, um Feuchtigkeitsereignisse detektieren zu können.

Im Projekt *EarlyDike* wurden am *ITA* verschiedene intelligente Geotextilien entwickelt, hergestellt und validiert. Die Validierungen der Messvliese I-IV fanden in klein- und großmaßstäblichen Modelldeichen am *IWW* statt. Dazu wurden Tests durchgeführt, um die Feuchtigkeitsmessung mittels textilintegrierter Sensoren zu untersuchen. Die Daten sollen an das vom *gia* entwickelte GeoPortal global zur Verfügung stehen.

Durch den Einsatz von Carbonfasern lässt sich der trockene vom feuchten Zustand unterscheiden. Die Verarbeitung von Carbonfasern in Form von Carbonrovings hat gezeigt, dass sich diese Sensorfasern auf das Geotextil aufbringen lassen. Dabei weisen die Carbonfasern Beschädigungen in Form Faserbrüchen auf. Die Faserbrüche führen dazu, dass sich Kurzschlüsse vor allem innerhalb von Sensorpaaren ausbilden. Die Kurzschlüsse traten sowohl bei den Carbonfasergerirken als auch bei den aufgestickten Carbonfasern auf. Eine Abhilfe schafft das Beschichten der Carbonfaserrovings bzw. der Carbonfasergerirke. Durch das Aufbringen einer zehnprozentigen Dispersion von SBR werden die Carbonfaserfilamente kompaktiert, so dass eine höhere mechanische Stabilität erreicht wird. Ein Ablösen einzelner Carbonfaserfilamente wird dadurch erschwert. Zusätzlich

schützt die SBR-Beschichtung vor Beschädigungen durch Fremdkörper, wie z. B. Sandkörner. Im Rahmen des Projekts wurden sowohl kleinskalige als auch großskalige Messvliese für die Validierung im Modelldeich hergestellt. Mit den eingesetzten Verfahren – Aufsticken von Carbonfaserrovings und thermisches Fügen von Carbonfasergewirken – ist die Verarbeitung verschiedener Größen möglich. Lediglich das Stickverfahren ist auf die Größe des Stickrahmens (ca. 7,2 x 2,0 m²) limitiert. Für das thermische Fügen wird ein automatisierter Kalandrierprozess benötigt.

Die Kontaktierung der Carbonfaserrovings stellt einen zusätzlichen Arbeitsschritt in der Herstellung der intelligenten Geotextilien her. Im Anwendungsfall am Realdeich wird die Kontaktierung nach der Ausbringung durchgeführt, um die sensiblen Kontaktstellen nicht zu schädigen. Die Kontaktstellen müssen besonders geschützt werden, weil aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeiten von Metall und Sensorfaser am Übergang Querkräfte auf die Fasern wirken, die Beschädigungen und Messartefakte verursachen. Die Kontaktstellen wurden daher mit Silikonmatten geschützt, um zusätzlich ein Eindringen von Wasser oder Feuchtigkeit zu verhindern. Dadurch werden zusätzlich Querströme innerhalb eines Sensorpaares vermieden. Die Messergebnisse aus Vorversuchen zeigen, dass sich die Widerstände der Sensorpaare auf unterschiedlichen Niveaus befinden. Die Unterschiede können zum einen aus unterschiedlichen Lauflängen der Sensoren rühren. Jedoch ist es wahrscheinlicher, dass sich die Übergangswiderstände der Kontaktierungen deutlich voneinander unterscheiden. Aufgrund der crimpähnlichen Verbindung von Carbonfaserroving und Aderendhülsen stehen hier unterschiedliche Kontaktflächen der Sensorpaare gegenüber. Die gegenseitige Beeinflussung von Sensorpaaren beim Feuchtigkeitsereignis spricht dafür, dass es dennoch Querströme innerhalb des intelligenten Geotextils gibt. Diese können von den Carbonfaserrovings selbst ausgehen (z. B. zwischen Sensorpaar 1 und 2 oder innerhalb der Kontaktierung). Um dies genauer zu untersuchen, wären umfangreiche Feuchtigkeitsmessungen notwendig, um den Einfluss zu quantifizieren.

Die entwickelte Messelektronik als Teil der Messkette wurde für Feuchtigkeitsversuche im klein- und großmaßstäblichen Modelldeich getestet. Dabei wurden die Sensoren durch Gleichspannung versorgt. Es konnten somit Feuchtigkeitsereignisse im intelligenten Geotextil detektiert werden. Bei Langzeitmessungen mittels Gleichspannung kann es jedoch zur Elektrolyse kommen. Dieser Prozess kann zu Partikel-Abscheidungen an den Sensoren führen, wodurch sich deren Widerstand erhöht. Es ist jedoch auch möglich, dass Korrosionsvorgänge zur Zerstörung der Sensoren oder den Kontaktstellen führen.

Um den Elektrolyseprozess während der Feuchtigkeitsmessung zu vermeiden, wurde eine Messung mit Wechselspannung durchgeführt. Aufgrund des ständigen Wechsels von Anode und Kathode, können sich dauerhaft keine Partikel abscheiden. Zusätzlich hat die Wechselspannungsmessung den Vorteil, dass ein Bandpassfilter eingesetzt werden kann, damit Störsignale aus dem Messsignal entfernt werden können. Diese Störsignale rühren aus elektromagnetischen Feldern her, die in die Sensorleitungen einstreuen, da die Sensoren wie große Antennen fungieren. Störsignale können bei Labormessung am Modelldeich (Versuchshalle des *IWW*) zum Beispiel durch Wasserpumpen oder schwere Elektromotoren hervorgerufen werden. In einer realen Messstrecke am Deich können Störsignale von Oberleitungen (Stromnetz oder Bahnnetz) hervorgerufen werden. Die Wechselspannungsmessung wurde am großmaßstäblichen Modelldeich des *IWW* mit Messvlies IV vorgenommen. Die Elektronik, bestehend aus dem Generator zur Erzeugung der Wechselspannung und der nachfolgenden Signalaufbereitung, wurde so ausgelegt, dass die Speisespannung

kompatibel zur Speisespannung des Libelium-Systems ist. Der Spannungsabfall am Sensorpaar wird durch einen Instrumentenverstärker verstärkt. Durch die Differenzbildung am Eingang des Instrumentenverstärkers werden eingestreute Störsignale deutlich verringert. Der anschließende Präzisionsgleichrichter erzeugt aus dem verstärkten Wechselspannungssignal eine Gleichspannung, die direkt mit dem A/D-Wandlereingang des Libelium-Systems verbunden wird. Über das Messprinzip besteht die Möglichkeit, mit nur einem Generator alle Sensoren im Textil (z. B. zehn Sensoren) zu speisen. Für jeden Sensor wird lediglich nur ein Instrumentenverstärker und Präzisionsgleichrichter benötigt. Zum Schutz vor Blitzeinschlag ist eine Schutzvorrichtung für die Elektronik notwendig, welche zwischen der Messkette und den Sensoren zu implementieren ist.

Im Rahmen der Anbindung an das GeoPortal konnten mit den im Projekt *EarlyDike* entwickelten Messvliesen Feuchtigkeitereignisse registriert und an das GeoPortal weitergegeben werden. Dabei bleibt noch zu klären, ob und wie weit eine Langzeitbeständigkeit der intelligenten Geotextilien besteht. Dies bezieht sich insbesondere auf die Sensoren und deren Kontaktierung. Zusätzlich lassen sich Feuchtigkeitereignisse registrieren, jedoch noch nicht ausreichend quantifizieren. Eine höhere Reproduzierbarkeit der Sensorkontaktierung ist daher erwünscht. Für die Anwendung in einer Testdeichstrecke wird ein Produktionsprozess benötigt, der die textile Flächenherstellung der intelligenten Geotextilien ermöglicht. Sowohl der Beschichtungs- als auch der Fügeprozess sind hierbei jedoch skalierbar.

8 Danksagung

Das Verbundprojekt *EarlyDike* lief vom 1. Juni 2015 bis zum 31. Mai 2018. Das Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)* im Rahmen des Sonderprogramms *Geotechnologien* gefördert (BMBF-Fördernummer: 03G0847A). Weiterführende Informationen zum Sonderprogramm *Geotechnologien* finden sich unter: <https://www.planeterde.de/projekte/geowissenschaften>.

9 Literaturverzeichnis

Cherif, C. (Hg.): *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-17992-1, 2011.

Christner, C.; Horoschenkoff, A.; Rapp, H.: Longitudinal and transverse strain sensitivity of embedded carbon fibre sensors. In: *Journal of Composite Materials*, Band 47, 2, 155–167, 2013.

DIN 8580: *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einleitung*. Berlin, Beuth, 2003.

Eichhoff, J.; Wendland, B.; Gries, T.: Tailored-Fiber-Placement: direktes dreidimensionales Sticken für bessere mechanische Bauteileigenschaften. In: *Technische Textilien*, 54, 3, 156–158, 2011.

Elsner, H.; Ulbricht, J.; Gelbrich, S.; Kroll, L.: Anwendung neuartiger Textilsensorensysteme zur Online-Überwachung von Tragstrukturen im Anlagenbau und im Bauwesen. In: *Tagungsband zur 12. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung*, Chemnitz, 30.09.2001–01.10.2009.

Frank, A.: Dehnungs- und Temperaturmessung in Verbundwerkstoffen mit eingebetteten faseroptischen Bragg-Gitter-Sensoren. Dissertation. ETH Zürich, 2001.

Gries, T.; Veit, D.; Wulforth, B.: Textile technology. An introduction. 2nd edition. ISBN 978-1-56990-565-4, 2015.

Herlé, S.; Becker, R.; Blanckenbach, J.; Mulckau, A.; Lehfeldt, R.: EarlyDike: Sensor- & Geodateninfrastruktur für ein sensor- und risikobasiertes Frühwarnsystem für Seedeiche. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 6, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A: Teilprojekt 5 – Sensor- & Geodateninfrastruktur, Geodätisches Institut der RWTH Aachen University (gia) & Bundesanstalt für Wasserbau, 2018.

Horoschenkoff, A.; Mueller, T.; Kroell, A.: On the characterization of the piezoresistivity of embedded carbon fibres. In: International Conference on Composite Materials, ICCM 17th, 2009.

Horoschenkoff, A.; Mueller, T.; Stroessner, C.; Farmbauer, K.: Use of carbon-fibre sensors to determine the deflection of composite-beams. In: International Conference on Composite Materials ICCM, 18th, 2011.

Krebs, V.; Schüttrumpf, H.: Entwicklung eines sensorbasierten Deichmonitorings. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben EarlyDike – Teil 4, BMBF-Förderkennzeichen 03G0847A: Teilprojekt 3 – Deichmonitor und Deichsimulator, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University, 2018.

Pengel, B.; Shirshov, G. S.; Krzhizhanovskaya, V. V.; Melnikova, N. B.; Koelewijn, A. R.; Pyayt, A. L.; Mokhov, I. I.: Flood Early Warning System: Sensors and Internet. In: Chavoshian, A.; Takeuchi, K. (Eds): IAHS Red Book N 357, Floods: From Risk to Opportunity, 445–453, ISBN 978-1-907161-35-3, 2013.

Quadflieg, T.: Gewirkte Verstärkungstextilien mit kohlenstofffaserbasierter Sensorik im Verbundwerkstoff mit mineralischer Matrix. Dissertation. RWTH Aachen University, 2017

Thiele, E.; Weigeand, F.; Helbig, R.; Barthel, A.: Bau- und Geotextilien auf Basis integrierter faseroptischer Sensoren. MFC Dornbirn 2009, Communicating the Textile Future, 48. Chemiefasertagung, Communicating the Textile Future, 48th Dornbirn International Man-Made Fibres Congress, Österreichisches Chemiefaser-Institut, Dornbirn, AT, 16.–18. Sep, 2009.

Uddin, A. J.: Novel technical textile yarns. In: Alagirusamy, R.; Das, A. (Eds): Woodhead Publishing Series in Textiles, Technical Textile Yarns, Woodhead Publishing, 259–297, ISBN 9781845695491, 2010.

Wipfler, M.; Gries, T.; Giannikopoulos, T.: Smart Rope: smartes Prüfen. Technische Textilien, Band 53, 4, 144–145, 2010.