

## Projekt 030

# Einsatz smarterer Fenster im Smart Home zur Prävention von Wassereintritt

## Schlussbericht



### Projektziel

Grundlegendokumentation für die Integration von Hochwasserschutz am Objekt in Smart Home-Lösungen, falls permanente Massnahmen nicht möglich sind



### Auftragnehmer

- Berner Fachhochschule BFH



### Projektbegleitung

- Andy Kipfer, geo7
- Benno Staub, VKF
- Martin Jordi, Präventionsstiftung



### Nutzen / ROI

- Schadenreduktion an exponierten Stellen durch Hochwasser und Starkregen
- Anwendungsdokument für die Integration von Hochwasserschutz ins Smarthome



# Einsatz smarter Fenster im Smart Home zur Prävention von Wassereintritt

Ein Forschungsprojekt im Auftrag der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen

Armin Senn-Rist, Dario Bühler und Michele Steiner

24. Februar 2023

# Impressum

## Auftraggeber

Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen (PS-KGV)

Martin Jordi (Geschäftsführer)

Bundesgasse 20

CH-3011 Bern

## Auftragnehmer

Berner Fachhochschule (BFH)

Institut für Siedlungsentwicklung und Infrastruktur

Kompetenzbereich Geotechnik und Naturereignisse

Pestalozzistrasse 20

CH-3401 Burgdorf

## Projektpartner und Funktion

BFH: Forschungspartner und Gesamtprojektleitung, Verfasserin dieses Forschungsberichts (ausser Kapitel 5.2, verfasst von PS-KGV)

ACO AG: Wirtschaftspartner für Gesamtsystem

Rascor AG: Wirtschaftspartner für Abdichtung

Porta AG: Wirtschaftspartner für Hochwasserschutz und Siedlungswasserwirtschaft

geo7 Geowissenschaftliches Büro: Umsetzungspartner für Oberflächenabfluss und hydrologische Daten

PS-KGV: Umsetzungspartner für Koordination mit anderen Smart Home Funktionen und BIM, Verfasserin von Kapitel 5.2 dieses Forschungsberichts

## Projektmitglieder

Armin Senn-Rist	BFH
Dario Bühler	BFH (ehem.)
Michele Steiner	BFH
Roger Rütli	BFH (ehem.)
Jolanda Jenzer	BFH
Stefan Trippel	ACO
Jürg Arnold	ACO
Roland Boeni	Rascor
Dominik Riner	Porta
Andy Kipfer	geo7
Martin Jordi	VKG
Benno Staub	VKG

# Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Inhaltsverzeichnis	3
1 Zusammenfassung	5
2 Einleitung	5
2.1 Ausgangslage und Stand der Forschung & Entwicklung	5
2.2 Zielsetzung und Abgrenzung	6
2.2.1 Ziele	6
2.2.2 Abzudeckende Gefahrenprozesse	6
2.3 Zielpublikum	7
2.4 Konzept des smarten Fensters zur Prävention von Wassereintritt in Gebäude	7
3 Abklärung der Rahmenbedingungen zum Einsatz smarter Fenster als Schutzmassnahme	8
3.1 Grundlagen	8
3.2 Auswahl der geeignetsten Schutzmassnahme	9
3.3 Haftung bei Schäden trotz smartem Fenster	10
4 Entwicklung der Schutzmassnahme «smartem Fenster» auf der Versuchsanlage	10
4.1 Methoden	10
4.1.1 Anforderungen	10
4.1.2 Versuchsanlage	12
4.1.3 Versuchsdesign	14
4.1.4 Beurteilungskriterien bzgl. Funktion	16
4.2 Resultate	18
4.2.1 Beurteilung untersuchter Varianten	18
4.2.2 Bestimmung und Weiterentwicklung Bestvariante	19
5 Empfehlungen für die baulich/technische Umsetzung smarter Fenster im Gebäude	20
5.1 System «Smartem Fenster»	20
5.1.1 Hardware	20
5.1.2 Software	22
5.1.3 Dimensionierung	23
5.1.4 Szenario Frost	23
5.2 Integration des smarten Fensters in IT-Umgebung (Autorin: VKG)	24
5.2.1 Koordination mit anderen Smart Home Funktionen	24
5.2.2 Koordination mit Building Information Modelling (BIM)	25
5.2.3 Mögliche Anwendung in Smart Cities	25
6 Fazit und Ausblick	26
7 Abbildungsverzeichnis	27
8 Tabellenverzeichnis	28

9	Literaturverzeichnis	29
10	Anhang	30

# 1 Zusammenfassung

Bei Hochwasser oder Oberflächenabfluss kann Wasser über geöffnete Keller- oder andere tief liegende Fenster ins Gebäude eindringen und grosse Schäden anrichten. Zur Lösung dieses Problems werden bis heute noch keine entsprechenden Systeme in der automatisierten, ferngesteuerten und vernetzten Gebäudetechnik, dem sog. Smart Home, angeboten.

In diesem von der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen (PS-KGV) geförderten Forschungsprojekt wurde daher untersucht, wie ein drohender Wassereintritt in Gebäude via tief liegende Fenster mittels Überwachung präventiv erkannt und mittels einer Steuerung des Fenster-Schliessmechanismus' automatisch verhindert werden kann. Dieses «smarte Fenster» wurde auf einer Versuchsanlage im Massstab 1:1 entwickelt und getestet. Dabei erkennen Sensoren bereits frühzeitig in den Lichtschacht des Fensters einströmendes Wasser, sodass über eine Steuerung das wasserdichte Fenster via Schliessmechanismus geschlossen werden kann.

Ausser der Dokumentation dieser Versuche und der Entwicklung des smarten Fensters (Kapitel 4) wird im vorliegenden Schlussbericht des Forschungsprojekts zunächst aufgezeigt, welche Rahmenbedingungen für den Einsatz dieser Schutzmassnahme abzuklären sind, um sie im Sinne des integralen Risikomanagements richtig einzusetzen (Kapitel 3). Smarte Fenster sind eine teilmobile Objektschutzmassnahme und können v.a. dann eine Option für den Schutz vor Naturgefahren darstellen, wenn raumplanerische sowie permanente bauliche Massnahmen bereits ausgeschöpft wurden oder nicht möglich sind. Sie lassen sich auch gut mit anderen Schutzmassnahmen kombinieren, um das Risiko insgesamt zu senken. Zudem werden Empfehlungen gegeben, was bei der baulich/technischen Umsetzung smarter Fenster in Gebäuden zu berücksichtigen ist (Kapitel 5). Dabei ist das zuverlässige Funktionieren des Gesamtsystems zentral, weshalb es unter den relevanten Szenarien getestet und seine Komplexität möglichst tief gehalten werden sollte. Des Weiteren wird kurz thematisiert, wie smarte Fenster mit anderen Komponenten des Smart Homes sowie mit Building Information Modelling (BIM) koordiniert werden können. Schliesslich wird ein Ausblick gewagt, welche Rolle solche Systeme künftig in Smart Cities spielen könnten.

Dieses Forschungsprojekt soll dazu beitragen, dass konkrete Produkte smarter Fenster von Firmen zur Marktreife entwickelt und angeboten werden, bei Neubauten eingeplant und bei bestehenden Gebäuden zur Prävention von Wassereintritt nachgerüstet werden. Zudem soll dieses Projekt dazu anregen, weitere Smart Home Technologien verstärkt auch zum Schutz vor Naturgefahren (weiter) zu entwickeln.

In dem hier vorliegenden Forschungsbericht wird das Projekt detailliert beschrieben und dient insbesondere der Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet. Ergänzend fasst ein kurzer Synthesebericht die wichtigsten Empfehlungen für die Praxis zusammen, die aus diesem Projekt abgeleitet werden konnten.

## 2 Einleitung

### 2.1 Ausgangslage und Stand der Forschung & Entwicklung

Wenn der Keller nicht der kühlen Lagerung von Nahrungsmitteln dient, wie früher üblich, sondern sich dort wertvolle Einrichtungen, etwa Computer- oder Gästezimmer, befinden, kann der Schaden bei Wassereintritt durch geöffnete Keller- oder andere tief liegende Fenster durch Hochwasser oder Oberflächenabfluss erheblich sein. Fenster werden zum Lüften von Keller/Tiefparterre oft auch bei Nacht oder Abwesenheit offengelassen und können dann im Ereignisfall meist nicht rechtzeitig vor dem Wassereintritt geschlossen werden. Überflutungsschäden verursachen in den 19 Kantonen mit öffentlich-rechtlichen Gebäudeversicherungen jedes Jahr Kosten in zwei- bis dreistelliger Millionenhöhe und damit über 40 % aller Elementarschäden (Vereinigung Kantonalen Gebäudeversicherungen [VKG], 2022).

Vor diesem Hintergrund eröffnen die Entwicklungen der Steuerung von Gebäudeeinheiten, d.h. des Smart Homes, völlig neue Möglichkeiten in der Elementarschadenprävention. Dieses Potenzial wurde bisher jedoch kaum genutzt, v.a. nicht für die Prävention von Wassereintritt. Eines der wenigen Beispiele hierfür ist der «Hagelschutz – einfach automatisch» der (VKG, 2023). Im Folgenden wird als Grundlage hierfür zunächst der Stand der Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet aufgezeigt.

Die weite Verbreitung von Internet und Smartphones haben der Gebäudeautomation, auch Domotik genannt und bekannter unter dem Stichwort Smart Home, zu einem regelrechten Boom verholfen. Die aktuell angebotenen vernetzten Systeme dieser Branche, speziell die mit Sensoren ausgestatteten Fenster, zielen darauf ab, den Komfort sowie die Sicherheit vor Einbruch und technischen Gefahren im Haus zu erhöhen. Die Prävention von Schäden an Gebäude und Menschen infolge Naturgefahren stehen dabei eindeutig nicht im Fokus.

Mit Komfort-Innovationen soll v.a. die Raumqualität verbessert werden. Um Temperatur und Qualität der Raumluft zu regeln, können Fenster, Storen und Rollläden automatisch geöffnet oder geschlossen und in ein Smart Home System integriert werden. Die Steuerung erfolgt entweder durch zeitliche Programmierung oder sensorisch, wobei selbstverständlich jederzeit manuell eingegriffen werden kann. Solche Produkte werden von zahlreichen Firmen angeboten. Wie gut sie in der Realität funktionieren, kann hier jedoch nicht beurteilt werden.

Hinsichtlich Innovationen zur Gebäudesicherheit im Zusammenhang mit Fenstern steht der Schutz vor Einbruch im Vordergrund. Einerseits kann das Öffnen & Schliessen von Fenstern und Rollläden zeitlich automatisch gesteuert werden. Zudem lassen sich in Fenster laut Herstellern Systeme integrieren, die Ver- oder Entriegelung erkennen und Hausbesitzer im Falle eines Einbruchversuchs warnen. Solche Alarmanlagen lassen sich ausserdem mit anderen Elementen eines Smart Home wie Bewegungsmeldern oder Sensoren zur Steuerung der Raumluft kombinieren, wie einige Hersteller versprechen.

Einige Hersteller bieten auch das automatische, sensorisch gesteuerte Schliessen von Fenstern (meist Dachfenstern) bei Regen an (z.B. Hausautomatisierung Koch). Dieses System ist jedoch nicht für den Hochwasserschutz konzipiert. Eine Smart Home Lösung für Hagelschutz wurde hingegen von der VKG schon etabliert, wie oben bereits erwähnt; bei einer Hagelwarnung durch SRF Meteo können Lamellenstoren eines Smart Home automatisch hochgefahren und somit teure Hagelschäden vermieden werden (SRF Meteo, 2016). Dieses System möchte die VKG nun auf den Schutz vor Wind/Sturm übertragen und in der Pilotregion Zürich testen (Jordi, 2018).

Neben Hagel und Sturm verursachen von allen Naturgefahren Hochwasser und Oberflächenabfluss die höchsten Kosten für die Gebäudeversicherungen durch Schäden an Gebäuden (VKG, 2023). Eine Smart Home Lösung zum Schutz vor eindringendem Hoch- und Oberflächenwasser in Untergeschosse bei fehlender Möglichkeit permanenter Schutzmassnahmen wird bis heute noch nicht angeboten.

## 2.2 Zielsetzung und Abgrenzung

### 2.2.1 Ziele

Aufgrund der dargestellten Ausgangslage besteht das übergeordnete Ziel dieses Forschungsprojekts darin, ein Überwachungs- und Steuerungsdispositiv für tief liegende<sup>1</sup> Fenster oder sonstige Gebäudeöffnungen zu entwickeln, das einen drohenden Wassereintritt ins Gebäude präventiv erkennt und das Fenster (sofern dann geöffnet) automatisch schliesst (und wieder öffnet, wenn die Gefahr vorüber ist). Gebäudeöffnungen mit diesen Eigenschaften werden im Weiteren stellvertretend als «smarte Fenster» bezeichnet.

Als weitere Ziele soll einerseits das Projekt in einem detaillierten Bericht für die Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet beschrieben werden (vorliegender Forschungsbericht), andererseits sollen die wichtigsten Erkenntnisse aus diesem Projekt als Empfehlungen für die Praxis in einem kurzen Synthesericht zusammengefasst werden.

### 2.2.2 Abzudeckende Gefahrenprozesse

Auf folgende Prozesse, durch die Wasser über Öffnungen ins Gebäude eindringen kann, ist das smarte Fenster auszulegen:

- Oberflächenabfluss
- Statische Überflutung (Fließgeschwindigkeit  $v_f < 1$  m/s)
  - Ausuferung Fließgewässer oder Gerinne

<sup>1</sup> «Tief liegend» bedeutet hier, dass die Unterkante der Gebäudeöffnung unterhalb des Wasserspiegels bei grösstmöglicher Überflutung liegt.

- Ausuferung See
- Aufstau Fließgewässer/Gerinne (z.B. durch Verkläuerung, Verstopfung von Durchlässen) → Ausuferung und unkontrollierter Abfluss
- Grundwasseraufstieg

Auf die Verhinderung von Wassereintritt über tief liegende Gebäudeöffnungen durch folgende weitere Prozesse ist das smarte Fenster in der vorliegenden Studie **nicht** ausgelegt:

- Regen
  - Regen mit starkem Wind (Schlagregen)
  - Starkregen mit Hagel
- Ablaufen von Tauwasser und Schmelzen von Reif, Eis oder Schnee am Fenster
- Schneefall, Schneeregen
- Hagel, Graupel
- Dynamische Überflutung (mitgeführte Feststoffe wie Schwemmholz/Geschiebe, Fließgeschwindigkeit  $v_f > 1$  m/s)
  - Ohne Feststoffumlagerung, d.h. Erosion/Sedimentation (Fließgeschwindigkeit  $v_f < 2$  m/s)
  - Mit Feststoffumlagerung (Fließgeschwindigkeit  $v_f > 2$  m/s)
- Sturmfluten (Überflutung von Küsten und Uferregionen durch starke Winde, welche Wasser vom Meer oder von Seen in Wellen an Land führen)
- Sturzfluten (extremer Oberflächenabfluss mit Feststofftransport)
- Ausbruch natürlich oder künstlich, lang- oder kurzfristig gestauter Seen und damit einhergehende Überflutung (z.B. Ausbruch von Gletscherseen oder durch Murgänge aufgestaute Gebirgsbäche)
- Murgänge
- Hangmuren
- Kanalisationsrückstau
- Lawinen

### 2.3 Zielpublikum

Der vorliegende Forschungsbericht ist für Fachleute bestimmt, die zum Risikomanagement von Hochwasser und Oberflächenabfluss forschen, sowie für Firmen, die Gebäudetechnik und Smart Home Technologien entwickeln. Diese Zielgruppen sollen dazu angeregt werden, das smarte Fenster sowie weitere Smart Home Technologien vermehrt zum Schutz vor Naturgefahren zu berücksichtigen und weiterzuentwickeln.

Für Gebäudeeigentümer, Architektinnen, Personen der Fachplanung und Gebäudeversicherungen ist dieser Bericht in der Regel zu ausführlich, sodass für diese Zielgruppen die wichtigsten, praxisrelevanten Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt als Empfehlungen zusammengefasst wurden. Dieser Synthesebericht soll dazu beitragen, dass die in der Baubranche Tätigen die Massnahme des smarten Fensters kennenlernen und in neuen sowie bestehenden Gebäuden fachgerecht einplanen und anwenden können. Schliesslich sollen von beiden Berichten – je nach Zielgruppe – Impulse für die Stadtplanung ausgehen, den Schutz vor Naturgefahren, v.a. vor Hochwasser und Oberflächenabfluss, in der Entwicklung von Smart Cities zu berücksichtigen.

### 2.4 Konzept des smarten Fensters zur Prävention von Wassereintritt in Gebäude

Das smarte Fenster stellt gemäss der Norm SIA 4002 eine teilmobile Massnahme zum Objektschutz vor Oberflächenabfluss und Hochwasser dar. Diese Objektschutzmassnahme zielt darauf ab, das Eindringen von Wasser durch Fenster und/oder Türen zu verhindern. Sie ist damit v.a. für den Keller bzw. für Untergeschosse geeignet, aber auch für tief positionierte Fenster im Erdgeschoss. Einerseits kann es für Neubauten eingeplant werden, andererseits lässt es sich aber auch in bestehenden Gebäuden nachrüsten.

In Kombination mit Rückstauventilen aus der Mischwasserkanalisation garantiert das System die Dichtigkeit von Unter- bzw. tief liegenden Erdgeschossen (z.B. Tiefparterre-Wohnungen) vor Schmutzwasser-



eintritt. Dadurch schützt es die genannten Geschosse sowie die darin enthaltenen Sachwerte (z.B. Computerserver). Das System verhindert somit Schäden, die bereits bei schwachen Intensitäten erheblich sein können, und häufig zu erwarten sind.

Hochwasserdichte Fenster sind bereits seit einigen Jahren auf dem Markt, motorisierte Schliessmechanismen von Fenstern schon lange. Wenn diese beiden Komponenten im hier entwickelten smarten Fenster kombiniert werden, kann einerseits der Schutz vor Hochwasser und Oberflächenabfluss sowie eine gute Lüftung von Kellerräumen durch bedarfsgerechtes Öffnen der Fenster gewährleistet werden. Bei Gefahr von Wassereintritt wird die Funktion Lüften übersteuert und das smarte Fenster automatisch und präventiv geschlossen.

Zur Prävention von Wassereintritt in Gebäude durch das smarte Fenster müssen verschiedene Elemente und Dateninputs zusammenwirken, wie in Abbildung 1 konzeptionell dargestellt. Dabei kann das System entweder autonom ausschliesslich mit lokaler Sensorik und Steuereinheit betrieben werden oder zusätzlich regionale Prognosedaten zu Wetter und Hochwassergefahr nutzen. Aufgrund der Redundanz bietet die letztere Lösung eine höhere Sicherheit, erfordert jedoch unter Umständen einen höheren technischen Aufwand.

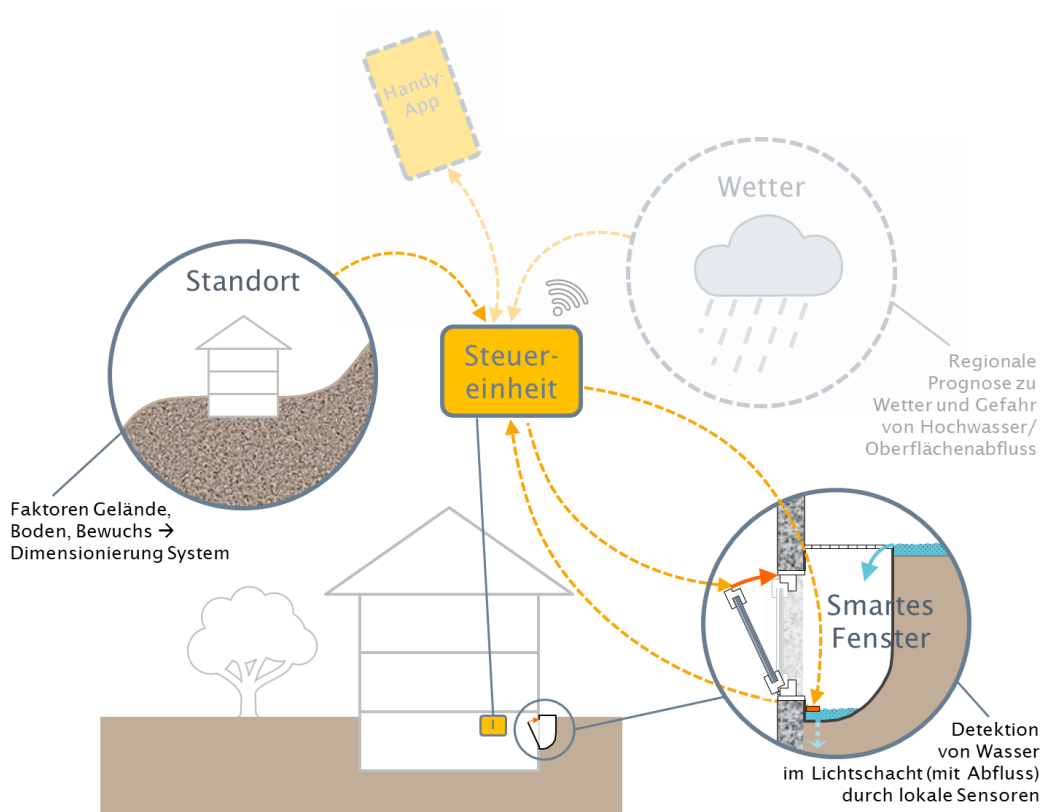


Abbildung 1: Konzept des smarten Fensters zur Prävention von Wassereintritt in Gebäude. Gestrichelt umrandete, blass dargestellte und grau beschriftete Elemente sind optional, die anderen obligatorisch.

### 3 Abklärung der Rahmenbedingungen zum Einsatz smarter Fenster als Schutzmassnahme

Um smarte Fenster im Sinne ihrer Zweckbestimmung einsetzen zu können, müssen zunächst die Rahmenbedingungen sorgfältig abgeklärt werden.

#### 3.1 Grundlagen

Der Schutz vor Naturgefahren, d.h. auch vor Hochwasser und Oberflächenabfluss, die hier relevant sind, erfolgt in der Schweiz durch das Integrale Risikomanagement (BAFU, 2020). Dieses umfasst alle Methoden und Massnahmen, um eine optimale Balance zwischen den Nutzungsansprüchen (die mit Freiheit einhergehen), dem Sicherheitsniveau und der finanziellen Tragbarkeit anzustreben. Teil dieser Mass-

nahmen ist auch der Objekt- bzw. Gebäudeschutz. In dessen Praxis lässt sich für eine konkrete Parzelle bzw. ein konkretes Gebäude die dort bestehende Gefahr infolge Hochwasser und Oberflächenabfluss über die Webseite [Schutz vor Naturgefahren](#) (2023) anhand des Naturgefahren-Checks (unter Menü rechts) ermitteln. Wenn am gewählten Standort keine Gefährdung durch Oberflächenabfluss und/oder Hochwasser besteht, sind keine Schutzmassnahmen nötig. Ansonsten werden je nach Art und Stand des Bauvorhabens bzw. Art des Umbaus geeignete Massnahmen empfohlen. Eine Empfehlung besteht darin, «Zugänge und Öffnungen vor Hochwasser und Oberflächenabfluss [zu] schützen», wobei die Norm SIA 261/1 und die dazugehörige Wegleitung SIA 4002 zu beachten sind. Hierfür sind auch smarte Fenster eine Option.

### 3.2 Auswahl der geeignetsten Schutzmassnahme

In welchen Fällen die Option des smarten Fensters sinnvoll ist, und in welchen Fällen andere Schutzmassnahmen vorzuziehen sind, wird in Abbildung 2 als Entscheidungsbaum dargestellt.

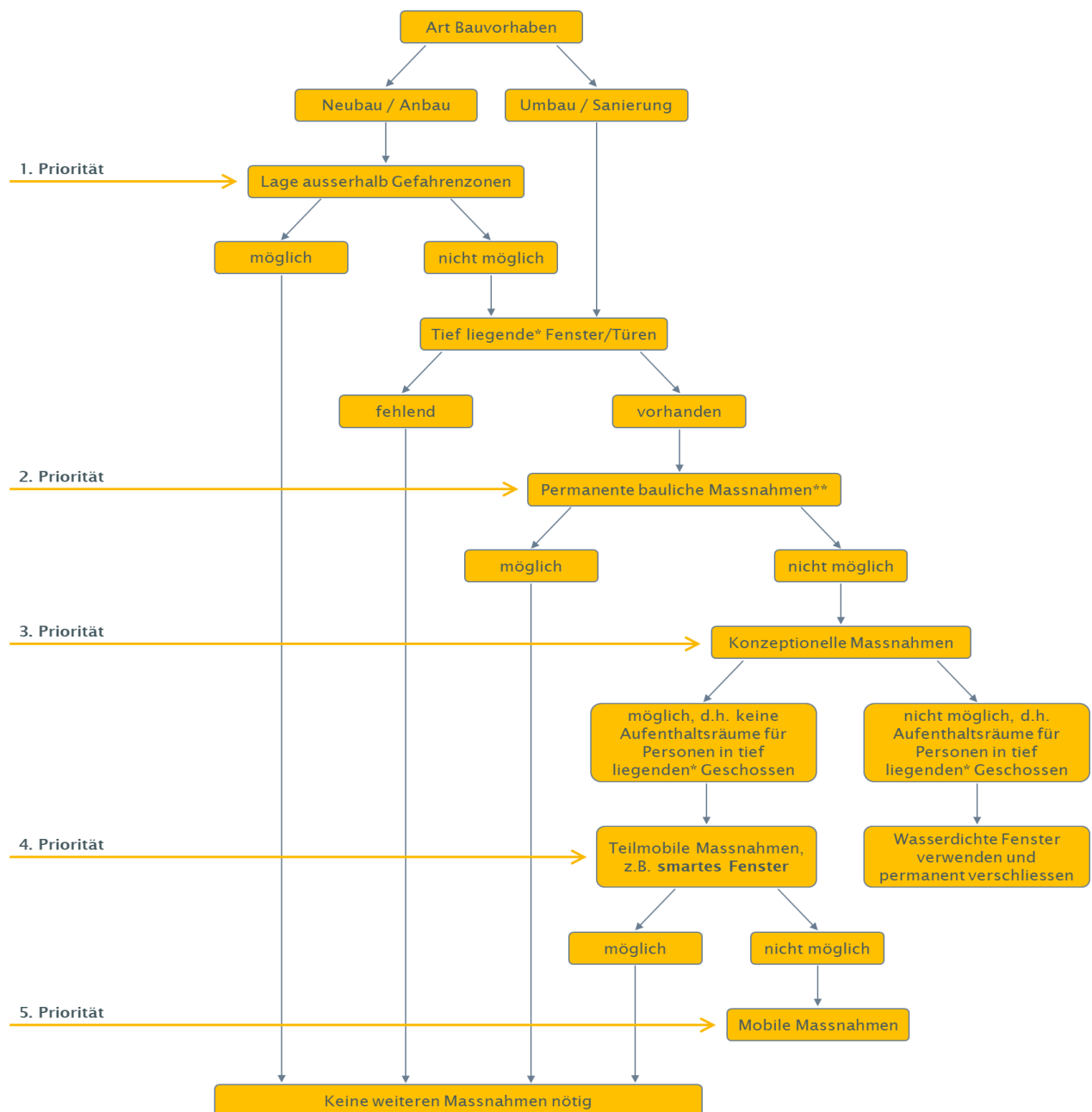


Abbildung 2: Entscheidungsbaum für die Auswahl von Massnahmen – inkl. dem smarten Fenster – zum Schutz vor Hochwasser und Oberflächenabfluss. \* «Tief liegend» bedeutet hier, dass die Unterkante der Gebäudeöffnung unterhalb des Wasserspiegels bei grösstmöglicher Überflutung liegt. \*\* Gemäss der SIA-Norm 261/1 sind bis zu einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren stets permanente Schutzmassnahmen vorzusehen.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass das smarte Fenster *keine* Option ist für Gebäude in Gefährdungszonen ohne permanente bauliche Massnahmen zum Schutz vor Hochwasser/Oberflächenabfluss, wenn sich in den tief liegenden Geschossen (Keller oder Tiefparterre) Räume für den permanenten Aufenthalt von Personen befinden. Wenn in diesem Fall das smarte Fenster versagen würde, wäre das Risiko von Personenschäden zu hoch.

### 3.3 Haftung bei Schäden trotz smartem Fenster

Auch wenn das smarte Fenster sorgfältig entwickelt, gemäss Entscheidungsbaum (Abbildung 2) eingesetzt, sachgemäss geplant, sowie fachgerecht eingebaut, betrieben und gewartet wird, verbleibt ein Restrisiko, dass das Fenster bei Überflutung oder Oberflächenabfluss versagt, Wasser ins Gebäude eintritt und erhebliche Schäden anrichtet. Dieses Restrisiko soll jedoch weder auf die Firmen solcher Systeme noch auf die Architekt/innen, Planer/innen oder Gebäudeeigentümer- oder -verwalter/innen abgewälzt werden. Denn sonst käme diese Innovation wohl kaum zur Anwendung und könnte nicht weiterentwickelt werden.

Daher sollten die kantonalen Gebäudeversicherungen garantieren, dass sie beim Einsatz smarter Fenster allfällige Gebäudeschäden infolge Wassereintritt in gleicher Weise versichern wie ohne diese Schutzmassnahme (unter dem Vorbehalt, dass die Sorgfaltspflicht gemäss oben genannten Anforderungen erfüllt wurde). Diese Strategie bietet die Möglichkeit, die neue Technologie des smarten Fensters breit einzuführen, welche (1) vermutlich einen Grossteil der sonst entstandenen Schäden zu verhindern vermag, (2) seitens der Nutzenden auf grosse Akzeptanz stossen dürfte, (3) und aufgrund vieler Anwendungen bei allfälligen Fehlfunktionen kontinuierlich weiterentwickelt werden kann.

## 4 Entwicklung der Schutzmassnahme «smartes Fenster» auf der Versuchsanlage

In diesem Kapitel wird die Entwicklung eines Prototyps des smarten Fensters gemäss dem unter 2.2 definierten ersten Ziel aufgezeigt, welche dem Konzept (2.4) folgt. Um den Einfluss der Faktoren, die für das System entscheidend sind, systematisch untersuchen zu können, erfolgte diese Entwicklung anhand einer Versuchsanlage.

### 4.1 Methoden

#### 4.1.1 Anforderungen

Der zu entwickelnde Prototyp des smarten Fensters soll konkret folgende Anforderungen erfüllen:

- *Verhindern von Wassereintritt durch stetigen Anstieg des Wassers im Lichtschacht oder auf dem Terrain direkt vor dem Fenster:*

Bei einem langanhaltenden oder intensiven Regenereignis sowie bei starker Schneeschmelze besteht die Gefahr, dass der Boden die vorhandenen Wassermengen nicht mehr aufnehmen kann, da der Boden bereits gesättigt ist oder die Infiltration in den Boden zu langsam erfolgt. Dann kommt es – bereits bei sehr leicht geneigtem Gelände – zu Oberflächenabfluss, wodurch Wasser in einen Lichtschacht laufen, diesen stetig auffüllen, und bei Erreichen der Unterkante eines geöffneten Fensters ins Gebäude (meist Keller oder Tiefparterre) eindringen kann. Um dies zu verhindern, sollen lokale Sensoren, die zum System des smarten Fensters gehören, einen solchen Wasseranstieg frühzeitig erkennen können und über eine Steuerung die rechtzeitige Schliessung des Fensters auslösen.

- *Reduktion des Schadensausmasses bei plötzlichem, starkem Wasserzufluss in den Lichtschacht:*

Im Fall eines plötzlichen eintretenden Platzregens oder einer dynamischen Überflutung des Terrains um den betreffenden Lichtschacht, z.B. durch einen Dambruch, ist mit einem parabelförmigen, schwallartigen Einströmen des Wassers über den Rand des Lichtschachts zu rechnen. Dabei ist es sehr wahrscheinlich, dass das Wasser über das geöffnete Fenster direkt ins Gebäude strömt, bevor es sich im Lichtschacht staut. In solchen extremen Fällen kann das smarte Fenster den Wassereintritt zwar nicht komplett verhindern, soll diesen jedoch deutlich reduzieren und damit grösseren Schaden abwenden. Um das Fenster gegen den dynamischen Wasserdruck noch schliessen zu können, müssen die Motoren zum Schliessen und Verriegeln des Fensters über genügend Leistung verfügen.

- *Alarmierung über Smart-Home-System bzw. Steuereinheit:*  
Im Ereignisfall sollen die beteiligten Personen via Smart-Home-System informiert/alarmiert werden. Dieser Alarm soll jedoch nur im Fall eines aussergewöhnlichen Ereignisses, das zu Schäden führen könnte, gesendet werden. Bei einer Schliessung des smarten Fensters aufgrund von Spritzwasser, kleineren Regenmengen mit leichtem Wasseranstieg im Lichtschacht etc. sollen die im Gebäude wohnenden Personen nicht gestört werden. Hierfür soll das System die Intensität des Ereignisses erfassen können. Zudem sollen Fehlauslösungen und -alarme des Systems möglichst verhindert werden, da sonst die Gefahr besteht, dass das System zugunsten einer guten Lüftung nicht eingesetzt wird oder die Alarmierungen nicht mehr ernst genommen werden. Die für das Gebäude verantwortlichen Personen sollen jedoch alarmiert werden, sobald eine Fehlfunktion des Fensters detektiert wird, um die Funktionsfähigkeit möglichst schnell wieder herstellen zu können und das Fenster bis dahin präventiv manuell zu schliessen.
- *Automatisches Öffnen des Fensters nach Ereignis:*  
So bald detektiert wird, dass ein Ereignis vorbei ist und kein Wasser mehr durch das Fenster in geöffnetem Zustand eindringen kann, kann das Fenster wieder geöffnet werden, um die Lüftung des Kellers zu gewährleisten. Falls das Ereignis aussergewöhnlich und mit Feststofftransport verbunden war, besteht die Gefahr, dass sich an der Fensteraussenseite Geschiebe und Schlamm angesammelt haben, welche beim Öffnen des Fensters ins Gebäude eindringen könnten. Wenn die Gefahr des Wassereintritts ins Gebäude nach einem automatischen Schliessen gemäss Detektion des Systems wieder abgeklungen ist, soll daher zum Öffnen des Fensters dafür eine Quittierung von den Benutzenden verlangt werden – manuell bei einer autonomen, lokalen Steuerung bzw. via Smart-Home-App bei Integration ins Smart Home.
- *Gewährleistung der Funktion auch bei Stromausfall (gerade bei Unwettern besonders häufig):*  
Da das Schliesssystem mit einem Elektromotor und einer elektronischen Steuerung funktioniert, ist für die Funktionsfähigkeit elektrischer Strom notwendig. Da bei einem Unwetterereignis die Gefahr eines Stromausfalls aber deutlich erhöht ist, soll die Fenstersteuerung mit einem Notstromsystem ausgestattet werden und die Steuerung mit einem Puffer-Akku oder Kondensator. Sobald der Stromausfall eintritt, soll das System mit dem kurzfristigen Notstrom das Fenster sofort schliessen und sich in einen Sicherheitszustand versetzen, bis der Strom wieder verfügbar ist. So wird nur ein relativ kleiner Stromspeicher benötigt, um auch bei Stromausfall einen Wassereintritt verhindern zu können. Sobald der Strom wieder verfügbar ist, soll sich das System wieder automatisch in Betrieb nehmen und seine Funktionsfähigkeit autonom überprüfen. Nur falls diese gewährleistet ist, soll sich das Fenster nach Quittierung durch die Benutzenden (siehe oben) wieder öffnen.
- *Autonome Funktionsprüfung:*  
Das System soll jeweils bei Inbetriebnahme und anschliessend periodisch eine Funktionsprüfung durchführen. Dazu soll das Fenster geschlossen und anschliessend wieder geöffnet werden. So soll sichergestellt werden, dass die Mechanik einwandfrei funktioniert und keine physischen Gegenstände eingeklemmt werden, die ein ordnungsgemässes Schliessen verhindern. Die Funktionsprüfung soll in einem regelmässigen Intervall (z.B. 24 Stunden) automatisch vorgenommen werden. Um die einwandfreie Funktionsfähigkeit des smarten Fensters gewährleisten zu können, muss das System zusätzlich zur Funktionsprüfung physisch gewartet werden. Die Intervalle hierfür sind vom Hersteller zu definieren; als Richtwert kann von 365 Tagen ausgegangen werden. Nach Erreichen dieser Zeitdauer soll das System die für die Wartung verantwortliche Person (vorgängig festzulegen) via Smart-Home-App benachrichtigen, dass und welche physische Wartung notwendig ist.
- *Wahlweiser Betrieb als autonomes oder vernetztes System mit lokaler Sensorik und Steuerung oder mit zusätzlicher Nutzung regionaler Prognose-Daten zu Wetter und Hochwassersituation:*  
Das System soll wahlweise autonom, ausschliesslich mit lokaler Sensorik und Steuerung betrieben werden können oder zusätzlich vernetzt mit dem Internet zur Nutzung regionaler Prognosedaten bzgl. Wetter und Hochwassergefahr sowie mit dem Handy zur Kommunikation mit den Nutzenden bzw. Verantwortlichen. Für den nicht zu seltenen Fall, dass die Internetverbindung unterbrochen ist, muss der autonome Betrieb jedoch unbedingt jederzeit aufrechterhalten werden. Für den sehr seltenen Fall, dass die lokale Sensorik trotz regelmässiger autonomer Funktionsprüfung nicht funktioniert, sollte der vernetzte Betrieb diese Phase überbrücken können. Zudem muss das manuelle Eingreifen jederzeit möglich sein.

#### 4.1.2 Versuchsanlage

Um das smarte Fenster unter verschiedensten Bedingungen realistisch testen und entwickeln zu können, wurde eigens zu diesem Zweck eine Versuchsanlage entworfen (Abbildung 3) und von der Firma ACO realisiert (Abbildung 4 und Abbildung 5). Diese Versuchsanlage umfasst eine realistische Nachbildung eines Kellerwandausschnitts mit Kipfenster und Lichtschacht im Massstab 1:1. Das wasserdichte Fenster kann über einen motorisierten Kettenantrieb geöffnet und geschlossen sowie mit einer motorisierten Griffolive (anstatt des Handgriffs) wasserdicht verriegelt werden. Als smarte Steuerung der Antriebe zum Kippen und Verriegeln des Fensters wurde die ACO Smart Box, die Smart-Home-Zentrale der Firma ACO, eingesetzt und nahe dem Fenster an der nachgebildeten Innenwand der Versuchsanlage angebracht (Abbildung 4). Diese Zentrale kommuniziert zum einen via Funk mit Wassersensoren, welche am Fenster bzw. im Lichtschacht zur Detektion von Wasser positioniert werden (Abbildung 3 und Abbildung 5), verarbeitet die mittels Sensoren gemessenen Daten gemäss einem programmierten Algorithmus und steuert automatisch das Schliessen und Öffnen des Fensters. Der Algorithmus für die Steuerung wird über die Smart-Home-App der Firma ACO via Smartphone programmiert und die Steuerzentrale damit bedient. In dieser App können zur Steuerung des Fensters Regeln und Szenarien festgelegt werden. So wird programmiert, bei welchen Inputs welcher Sensoren das Fenster öffnet bzw. schliesst und bei welchen Inputkombinationen ein Alarm ausgelöst wird. Mittels eines Schalters lässt sich das Fenster jederzeit auch manuell steuern, wobei die smarte Steuerung übersteuert wird (Abbildung 4). Die Stromversorgung aller elektrischen Komponenten erfolgt über einen Schaltkasten (Abbildung 4). Die Smart Box benötigt eine Internetanbindung und wurde daher via LAN an einen Router angeschlossen.

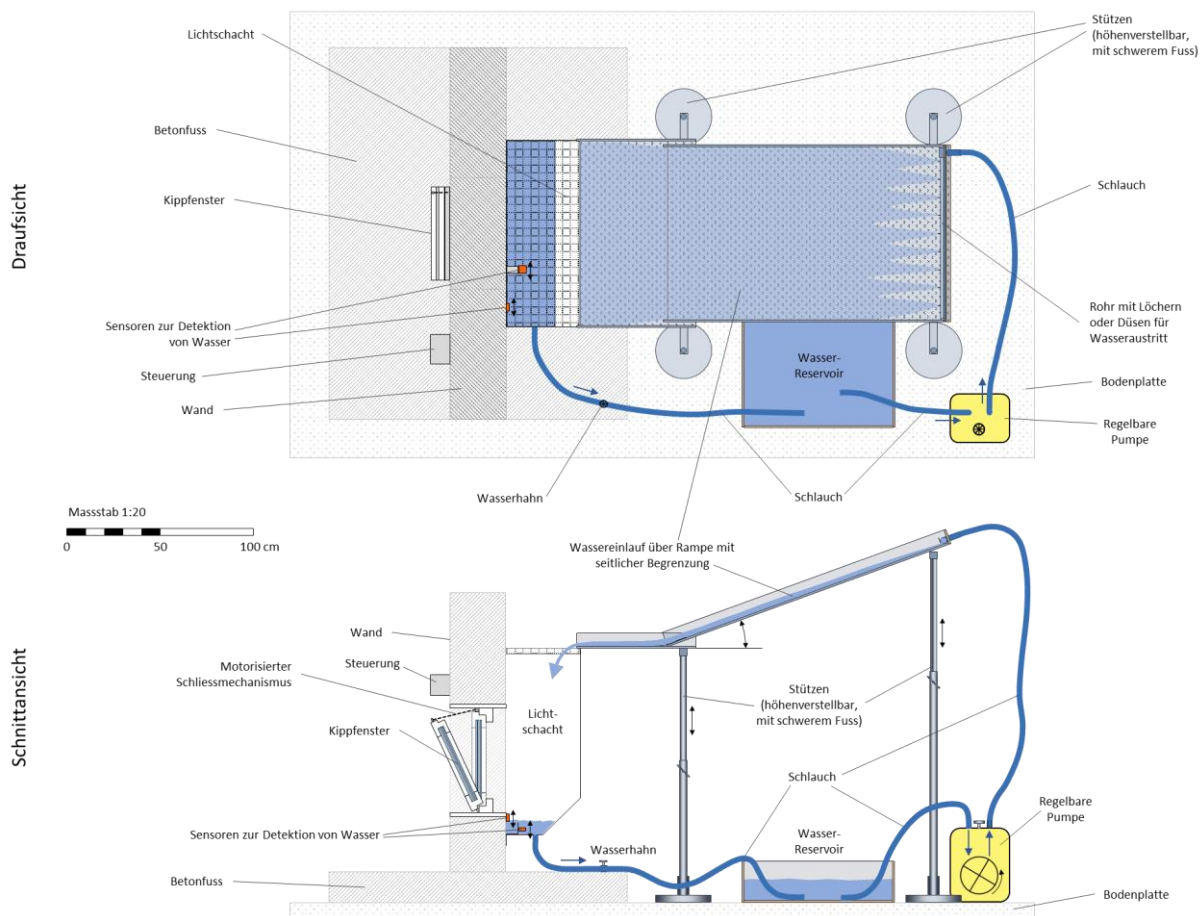


Abbildung 3. Funktions-skizze der Versuchsanlage zur Entwicklung des Prototyps eines smarten Fensters.

Das Fenster hat eine Grösse von 70 cm x 50 cm und wurde von der Firma rascor AG wasserdicht in die Lochlaibung der Betonwand eingebaut. Als Lichtschacht dient ein Fertigbauteil, hier ein Modell der Firma ACO, welches auf die Fenstergrösse abgestimmt ist. Die Schale des Lichtschachts, die beim realen Einsatz an einem Gebäude ins Erdreich eingelassen wird und weitgehend unter der Geländeoberfläche liegt, besteht aus wasserdichtem Hartkunststoff und wurde wasserundurchlässig an die Aussenwand



der Versuchsanlage montiert. Wie üblich bei Lichtschächten in Fertigmodulbauweise, schliesst auch der hier verwendete oben mit einem aufgelegten Metallgitter ab, damit keine Personen in den Lichtschacht fallen können und das Eindringen von Laub, Zweigen oder anderen gröberen Gegenständen verhindert wird. Da dieses Gitter das Wasser beim Einströmen ablenkt, wurde es auch für die Versuche verwendet, um möglichst realitätsgetreue Bedingungen zu schaffen.

Die definierte Wassereinleitung in den Lichtschacht auf nahezu dessen gesamter Breite erfolgt über eine geneigte, breite Metallrinne. Diese liegt einerseits auf der äusseren Lichtschachtkante auf, andererseits auf höhenverstellbaren, standfesten Stützen. Die an den Lichtschacht angrenzende Geländeoberfläche (Rasen, Verbundsteine, Asphalt, ...) ist in Realität zwar meist deutlich rauer als die Oberfläche der Metallrinne. Doch in Realität liegt die Schwelle, d.h. die Lichtschacht-Oberkante, meist etwas höher als das umliegende Gelände, sodass das Wasser bis zu dieser Schwelle gestaut wird und sie danach überströmt. Der Strömungswiderstand ist dabei relativ gering, sodass der Wassereinlauf mittels der glatten Metallrinne durchaus realitätsnah simuliert werden kann.

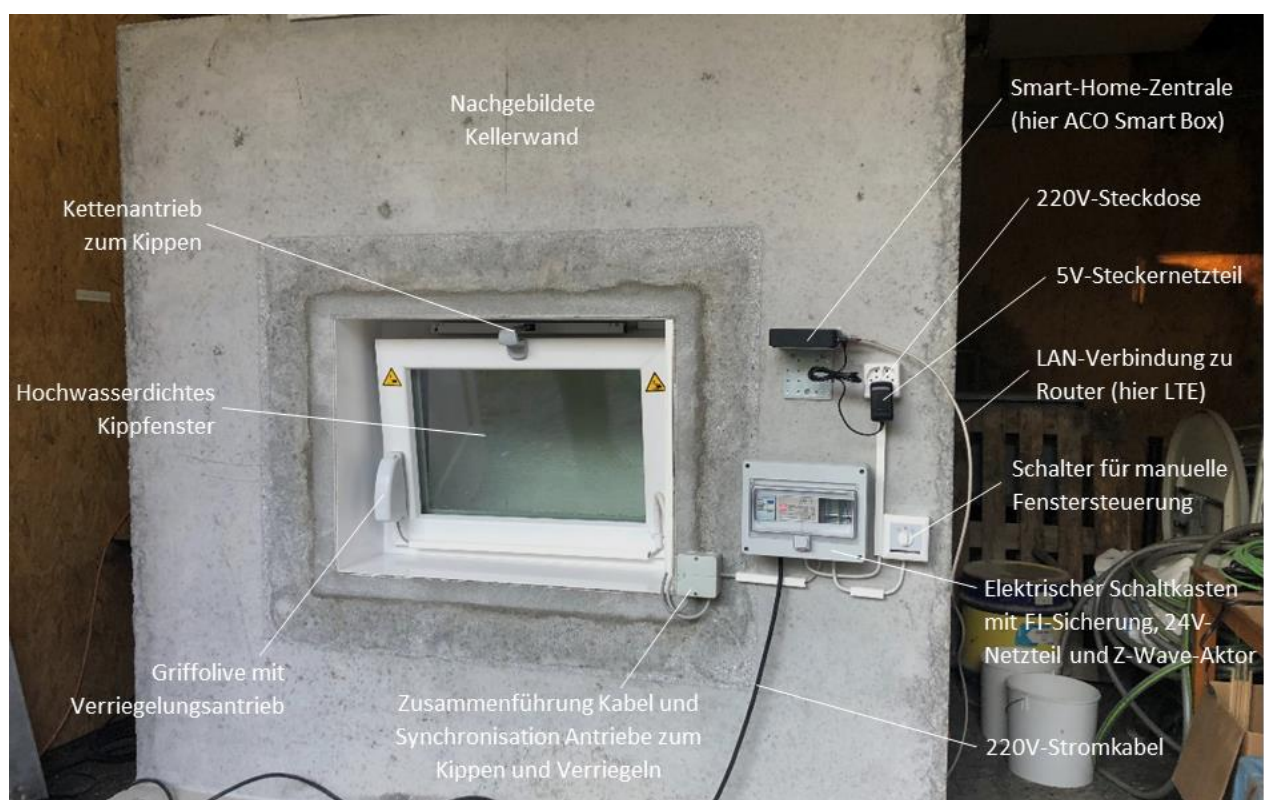


Abbildung 4. Realisierte Versuchsanlage mit Komponenten auf Innenseite der nachgebildeten Kellerwand.

Am oberen Ende der Metallrinne ist ein querliegendes Rohr mit gleichmässig verteilten Wasseraustrittsöffnungen befestigt. Damit lässt sich ein Wasserstrom auf der Rinne erzeugen, der über dessen ganze Breite etwa gleichmässig verteilt ist. In dieses querliegende Verteilerrohr wird Wasser aus einem Reservoir mittels zwei Pumpen (hier Modell «Kärcher BP 5 Home and Garden») über Schläuche hochgepumpt. Die Pumpen haben eine effektive, gemessene Leistung von je 23 l/min, sodass ein Wasserstrom von 46 l/min erzeugt werden kann. Das hochgepumpte Wasser fliesst über die Metallrinne durch den Gitterrost in den Lichtschacht und an dessen unterem Ende über eine Öffnung und einen Schlauch zurück ins Wasserreservoir, sodass ein geschlossener Wasserkreislauf entsteht. Um einen Wasserstau im Lichtschacht zu erzeugen, kann der Abfluss daraus mittels eines Wasserhahns unterbrochen werden.

Zur Detektion von Wasser im Lichtschacht stehen für die Versuchsanlage Sensoren zur Verfügung, wovon einer inkl. Kabel und Funkvorrichtung ausserhalb des Lichtschachts in Abbildung 5 rechts dargestellt ist. Die Sensoren können im Lichtschacht an beliebigen Stellen positioniert und mit Klebstoff zum Zweck der Versuche reversibel befestigt werden. Mit steigender Anzahl Sensoren wird die Steuerung komplizierter und damit anfälliger und die Kosten der Hardware erhöhen sich. Daher sollen so wenig wie möglich Sensoren eingesetzt werden, aber so viele wie nötig, um ein möglichst breites Spektrum

an Ereignisfällen zuverlässig erkennen können. So wurde die Anzahl Sensoren für die Versuche auf dieser Anlage auf zwei beschränkt.

Für die Untersuchungen und die Entwicklung des smarten Fensters wurde die Versuchsanlage mit einem Gabelstapler in einem geschlossenen Holzschopf der Berner Fachhochschule in Burgdorf platziert (Abbildung 5). Damit konnten störende Witterungseinflüsse wie Regen und Wind sowie ein Gefrieren des Wassers ausgeschlossen und reproduzierbare Versuchsbedingungen gewährleistet werden. Die Anbindung ans Internet, welche für die ACO Smart Box nötig ist, wurde mit einem LTE-Router realisiert. Die Versuchsanlage wurde am 08. November 2021 zusammen mit Stefan Trippel (Firma ACO) in Betrieb genommen. Dazu wurde das Smartphone, welches für die Tests verwendet wurde, über die App mit der Smart-Home-Zentrale verbunden. In der App wurde die Steuerung so programmiert, dass sich das Fenster schliesst, sobald Sensor 1 mit Wasser in Berührung kommt. Sensor 2 hat keinen Einfluss auf den Schliessmechanismus, schlägt jedoch bei Wasserkontakt Alarm. Mit diesem Setup wurden alle Versuche zur Entwicklung des smarten Fensters durchgeführt.



Abbildung 5. Realisierte Versuchsanlage mit Komponenten auf Aussenseite der nachgebildeten Kellerwand. Blick von oben (links), Blick auf Aussenwand (rechts).

#### 4.1.3 Versuchsdesign

Um das smarte Fenster zu entwickeln, wurden auf der in 4.1.2 beschriebenen Versuchsanlage verschiedene Varianten gemäss dem Konzept (2.4 und Abbildung 1) getestet. Entsprechend dem übergeordneten Ziel war die primäre Zielvariable der Versuche das «Verhindern von Wassereintritt». Als sekundäre Zielvariable wurden Fehlauflösungen erfasst, d.h. Fensterschliessungen ohne Gefahr von Wassereintritt. Diese Zielvariablen wurden für die einzelnen Varianten qualitativ bestimmt und semi-quantitativ mit Punkten ausgedrückt (siehe 4.1.4).

Aus der systematischen Variation der technischen Einflussfaktoren «Anzahl Sensoren» (1 oder 2) und «Position Sensoren im Lichtschacht» wurden 6 Varianten abgeleitet, die in Abbildung 6 dargestellt sind. Ergänzend werden im Folgenden die einzelnen Varianten beschrieben und begründet.

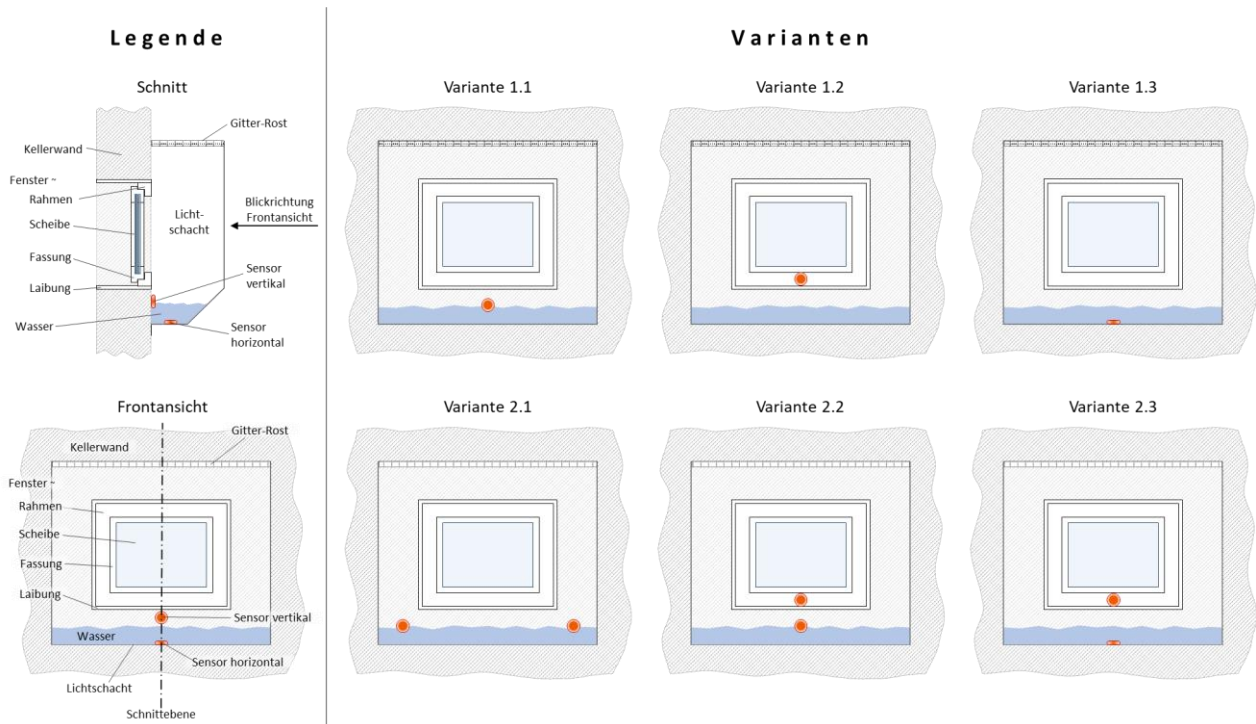


Abbildung 6. Varianten des smarten Fensters durch systematische Variation der Anzahl Sensoren zur Wasserdetektion (1 oder 2) sowie deren Position im Lichtschacht. Die Sensoren wurden unverhältnismässig gross dargestellt, damit sie leichter erkennbar sind. Variante 2.1 wurde nicht getestet, was im Text begründet wird.

#### *Variante 1.1 «1 Sensor unter Fenster»*

Bei dieser Variante wurde ein Sensor (Sensor 1 zur Auslösung der Fensterschliessung) unterhalb der Fensterlaibung etwa in der horizontalen Mitte des Lichtschachts vertikal befestigt. Der Sensor soll im Lichtschacht ansteigendes Wasser erkennen, bevor dieses die Unterkante des Fensters erreicht hat. Sobald der Sensor mit Wasser in Kontakt kommt, wird das Fenster geschlossen.

#### *Variante 1.2 «1 Sensor am Fensterrahmen»*

Im Vergleich zu Variante 1.1 ist der Sensor 1 hier etwas höher positioniert, nämlich an der Unterkante des Fensterrahmens. Dies hat den Vorteil, dass der Sensor und dessen Verkabelung für eine spätere reale Anwendung direkt in den Fensterrahmen integriert werden können und somit eine zusätzliche Installation im Lichtschacht entfällt.

#### *Variante 1.3 «1 Sensor am Lichtschacht-Boden»*

In dieser Variante wird der Sensor 1 am Boden des Lichtschachts in horizontaler Position befestigt. Der Sensor erkennt Wasser, wenn dieses im Lichtschacht ca. 1 cm hoch steht. So lässt sich eindringendes Wasser möglichst früh erkennen und das Fenster schliessen.

#### *Variante 2.1 «2 Sensoren, je 1 rechts und links unter Fenster»*

Hier sind 2 Sensoren vorgesehen, je einer rechts und links seitlich des Fensters unterhalb des Fensterrahmens, wobei die Höhe beider Sensoren derjenigen in Variante 1.1 entspricht. Hinter dieser Variante steht die Überlegung, dass Wasser schwallartig von einer Seite her in den Lichtschacht strömen und dabei auf jeder Seite früher erkannt werden könnte als von einem Sensor in der horizontalen Mitte. Da sich jedoch seitlicher Wasserzufluss in den Lichtschacht mit der hier verwendeten Versuchsanlage nicht simulieren lässt, wurde auf Versuche mit dieser Variante verzichtet. Der Vorteil gegenüber Variante 1.1 bei einem schwallartigen Wasserzufluss von der Seite wird ohnehin als marginal eingeschätzt.

#### *Variante 2.2 «2 Sensoren, 1 unter Fenster, 1 am Fensterrahmen»*

Hierbei handelt es sich um eine Kombination der Varianten 1.1 und 1.2. Mit dem unten platzierten Sensor 1 kann ansteigendes Wasser frühzeitig erkannt und das Fenster geschlossen werden. Wenn das Wasser im Lichtschacht den Fensterrahmen erreicht, spricht der hier platzierte Sensor 2 an und löst Alarm aus als Information der Gebäudeverantwortlichen. In diesem Fall eines stärkeren Überflutungereignisses kann die Steuerung so programmiert werden, dass das Fenster nur durch eine manuelle



Quittierung wieder geöffnet werden kann. So kann verhindert werden, dass allenfalls in den Lichtschacht eingetragenes Geschiebe durchs Fenster eindringt, wenn sich dieses nach Absinken des Wasserspiegels im Lichtschacht automatisch wieder öffnen würde.

#### *Variante 2.3 «2 Sensoren, 1 am Lichtschacht-Boden, 1 am Fensterrahmen»*

Hier werden die Varianten 1.2 und 1.3 kombiniert. Im Vergleich zu Variante 2.2 liegt hier der unten platzierte Sensor 1 noch tiefer, nämlich auf dem Lichtschachtboden. Dadurch registriert er Wasser bereits dann, wenn dieses ca. 1 cm hoch im Lichtschacht steht. Die Funktion des oberen Sensors 2 ist gleich wie bei Variante 2.2.

Neben diesen technischen Einflussfaktoren wurde als natürlicher die Art des Wassereintritts in den Lichtschacht anhand folgender drei Szenarien berücksichtigt:

1. Langsam ansteigender Wasserspiegel im Lichtschacht (LW), z.B. durch statisches Hochwasser
2. Schneller, schwallartiger Wasserzufluss in Lichtschacht (SW), z.B. durch Oberflächenabfluss
3. Beregnung des Lichtschachts (RE), durch normales, d.h. bzgl. Wassereintritt gefahrloses Regenereignis

Das erste Szenario wurde auf der Versuchsanlage mit den 2 Pumpen realisiert, d.h. mit einem Wasserzufluss in den Lichtschacht von insg. 46 l/min, was einem 1-jährigen Regenereignis, d.h. einer Niederschlagsintensität von ca. 20 mm/h, auf einer Fläche von 140 m<sup>2</sup> in der Regenregion Mittelland/Tessin-Nord (Norm VSS 40350) entspricht. Dabei fliesst das Wasser auf der Innenseite der Lichtschachtwand ab, sodass der Wasserstand im Lichtschacht langsam ansteigt.

Zur Realisierung des zweiten Szenarios eines schwallartigen Wasserzuflusses auf der Versuchsanlage wurde die Zulaufrinne aus Metall zunächst am vorderen Rand erhöht, damit sie sich mit Wasser füllte. Anschliessend wurde die Rinne hinten angehoben, sodass das Wasser schwallartig in den Lichtschacht strömte. Der genaue Wasserfluss konnte bei diesem Versuch nicht bestimmt werden, was aber auch nicht relevant ist für die Beurteilung, wie die einzelnen Varianten dieses Szenario bewältigen. Der Wasserzufluss spielt jedoch für die Dimensionierung des Systems eine Rolle (Kapitel 5.1.3)

Das dritte Szenario eines alltäglichen Regens wurde auf der Versuchsanlage durch Übergiessen des Lichtschachts mit Wasser aus einer Giesskanne mit Diffusor-Aufsatz simuliert. Auch hier wurde der genaue Wasserfluss nicht bestimmt, da dies für die Beurteilung der einzelnen Varianten nicht von Bedeutung ist. Anhand dieses Versuchs soll lediglich geprüft werden, ob Sensor 1 bereits bei einem normalen, d.h. bzgl. Wassereintritt ins Gebäude ungefährlichen Regen eine Schliessung des Fensters auslöst.

Die fünf Varianten 1.1, 1.2, 1.3, 2.2 und 2.3 wurden jeweils für diese drei Szenarien mit je einem Versuch getestet. Daraus ergeben sich 15 Einzelversuche. Auf Wiederholungen der Einzelversuche wurde verzichtet, da die Funktion einer Variante bei einem Szenario durch Beobachtung anhand der definierten Beurteilungskriterien (4.1.4) qualitativ eindeutig bestimmt werden konnte.

#### 4.1.4 Beurteilungskriterien bzgl. Funktion

Die Funktion der fünf Varianten 1.1, 1.2, 1.3, 2.2 und 2.3 wurde anhand folgender Kriterien mit Punkten beurteilt (siehe auch Tabelle 1):

##### – *Verhindern von Wassereintritt*

Zentral für die Beurteilung der Varianten ist das Kriterium, inwiefern der Wassereintritt ins Gebäude verhindert werden kann. Jede Variante wurde bzgl. dieses Kriteriums für zwei Szenarien geprüft, nämlich (1) für langsam (LW) und (2) schnell/schwallartig ansteigendes Wasser im Lichtschacht (SW). Je nach Erfüllung des Kriteriums wurden 0 bis 4 Punkte vergeben, wobei 0 Punkte «Wassereintritt nicht verhindert» bedeutet und 4 Punkte «Wassereintritt komplett verhindert» (Definition Zwischenstufen: siehe Tabelle 1). Für das Szenario LW wird dieses Kriterium mit Faktor 3 gewichtet, für das Szenario SW mit Faktor 2. Der Grund hierfür liegt darin, dass Szenario LW viel häufiger vorkommt und der dadurch drohende Wassereintritt ins Gebäude prioritär verhindert werden soll, während beim Szenario SW aufgrund dessen Seltenheit eher toleriert werden kann, dass etwas Wasser eintritt. Jedoch wird auch beim Szenario SW der verursachte Schaden durch das smarte Fenster auf einen Bruchteil verringert.

– *Fehlauslösungen*

Anhand dieses Kriteriums wird beurteilt, inwiefern das System die Schliessung des Fensters auch bei ungefährlichen Ereignissen auslöste, d.h. wenn keine Gefahr für Wassereintritt ins Gebäude bestand, z.B. durch normalen Regen oder einen geringen, kurzzeitigen Wasseranstieg im Lichtschacht; derartige Auslösungen der Fensterschliessung wurden als Fehlauslösungen interpretiert. Letztere gilt es zu minimieren, um die Lüftungsfunktion des Fensters nicht unnötigerweise einzuschränken. Diese Beurteilung erfolgt mit Hilfe aller drei Szenarien, d.h. LW, SW und RE. Beim Szenario RE sollte die Fensterschliessung überhaupt nicht ausgelöst werden, bei den Szenarien LW und SW nur dann, wenn es sich tatsächlich um ein gefährliches Ereignis handelt. Dabei wurden entsprechend der Häufigkeit möglicher Fehlauslösungen Punkte zwischen 0 (häufig möglich) bis 2 (fast unmöglich) vergeben (Definition Zwischenstufen: siehe Tabelle 1). Dieses Kriterium wird für alle drei Szenarien mit dem Faktor 1 gewichtet.

– *Alarmierung*

Hier wird zunächst beurteilt, ob das System überhaupt in der Lage ist, nicht nur die Fensterschliessung auszulösen, sondern auch zu alarmieren, wenn es sich tatsächlich um ein gefährliches Ereignis handelt. Falls das System nicht alarmieren kann (oder der Alarm direkt bei der Auslösung der Fensterschliessung erfolgt), werden 0 Punkte vergeben. Falls das System grundsätzlich zu alarmieren vermag, wird zusätzlich beurteilt, inwiefern Fehlalarm möglich ist; ein Fehlalarm liegt dann vor, wenn bei einem ungefährlichen Ereignis (kurzzeitiger, leichter Wasseranstieg im Lichtschacht) alarmiert wird. Fehlalarm gilt es zu verhindern, da sonst die Gefahr besteht, dass die Nutzenden Alarme überhaupt nicht mehr ernst nehmen, auch nicht bei tatsächlich gefährlichen Ereignissen. Wenn Fehlalarm teilweise möglich ist, wird 1 Punkt vergeben, falls Fehlalarm fast unmöglich ist, 2 Punkte. Dieses Kriterium wird für alle drei Szenarien angewandt und jeweils mit dem Faktor 1 gewichtet.

– *Anzahl Sensoren*

Die Anzahl an Sensoren hat einen Einfluss auf die Komplexität und vor allem die Kosten des Systems. Jeder zusätzliche Sensor erhöht die Entwicklungs- und Programmierungskosten sowie auch die Hardwarekosten des Systems. Die Gefahr von Defekten und Störungen ist umso grösser, je mehr elektronische Bestandteile das System besitzt. Daher wird eine Variante bzgl. dieses Kriteriums mit 0 Punkten bewertet, wenn zwei Sensoren benötigt werden, mit 1 Punkt, wenn die Variante mit nur einem Sensor auskommt. Da dieses Kriterium die Zuverlässigkeit des Systems beeinflusst, wird es mit Faktor 2 gewichtet.

– *Montageaufwand*

Die Höhe von Montageaufwand und somit auch Montagekosten des Systems werden mitentscheiden, ob das System breite Anwendung im Objektschutz findet. Daher werden die Varianten zuletzt danach beurteilt. Konkret wird beurteilt, ob und wie viele Sensoren inkl. Kabelinstallation und Abdichtung im Fensterrahmen bereits bei dessen Herstellung integriert werden können. Dadurch vereinfacht und verbilligt sich die Montage vor Ort deutlich. Denn wenn jeder Sensor, der nicht vorgefertigt im Fensterrahmen integriert ist, muss vor Ort im schwer zugänglichen Lichtschacht witterungsbeständig montiert werden. Zudem muss eine abgedichtete Kabeldurchführung durch die Kellerwand oder eine Funkverbindung realisiert werden, um den Sensor mit der Steuerungszentrale im Gebäudeinneren zu verbinden. Daher werden 0 Punkte vergeben, wenn kein Sensor im Fensterrahmen integrierbar ist, 1 bzw. 2 Punkt/e, wenn ein/zwei Sensor/en integrierbar sind. Der Begriff «integrierbar» weist auf diese Möglichkeit hin, denn in den hier durchgeführten Versuchen wurden die Sensoren weder in den Fensterrahmen integriert noch witterungsbeständig montiert, was aber auch nicht nötig war. Dieses Beurteilungskriterium wird mit Faktor 1 gewichtet.

– *Gewichtetes Total*

Schlussendlich werden die gewichteten Punkte bzgl. aller Kriterien aufaddiert. Das so gebildete gewichtete Total an Punkten ist eine Gesamtbeurteilung jeder einzelnen Variante; je höher das gewichtete Total, desto geeigneter wird eine Variante eingestuft. Das mögliche Spektrum des gewichteten Totals reicht von 0 bis 36 Punkten. Damit lässt sich die Bestvariante ermitteln und aufgrund der in den Versuchen gewonnenen Erkenntnissen weiterentwickeln.

## 4.2 Resultate

### 4.2.1 Beurteilung untersuchter Varianten

Die Beurteilung der untersuchten Varianten nach den zuvor definierten Kriterien ist Tabelle 1 zu entnehmen. Für jede Variante wird deren Beurteilung im Folgenden begründet.

Tabelle 1. Beurteilung der untersuchten Varianten durch Punktevergabe nach gewichteten Kriterien, teils für unterschiedliche Szenarien (LW bzw. SW = langsamer bzw. schneller/schwallartiger Wasseranstieg im Lichtschacht, RE = Beregnung des Lichtschachts). Die Varianten sind in 4.1.3 definiert und in Abbildung 6 dargestellt. Wie in 4.1.3 begründet, wurde Variante 2.1 nicht getestet und ist daher hier nicht aufgeführt. Variante 2.3+ wurde erst nach Auswahl der Bestvariante unter den zunächst untersuchten Varianten 1.1, 1.2, 1.4, 2.2 und 2.3 entwickelt und dann ebenfalls auf der Versuchsanlage getestet.

Kriterium	Bedeutung Punkte	Szenario	Variante > Gewichtung	Ungewichtete Punkte für ...						Gewichtete Punkte für ...					
				1.1	1.2	1.3	2.2	2.3	2.3+	1.1	1.2	1.3	2.2	2.3	2.3+
				Verhindern von Wassereintritt	0 Wassereintritt nicht verhindert	LW	3	4	2	4	4	4	4	12	6
	1 Wassereintritt ein wenig verhindert	SW	2	1	0	3	1	3	3	2	0	6	2	6	6
	2 Wassereintritt mittelmässig verhindert	Total	-	-	-	-	-	-	-	14	6	18	14	18	18
	3 Wassereintritt grossteils verhindert														
	4 Wassereintritt komplett verhindert														
Fehlauslösung	0 Häufig möglich	LW	1	1	2	0	2	2	2	1	2	0	2	2	2
	1 Teilweise möglich	SW	1	2	2	0	2	2	2	2	2	0	2	2	2
	2 Fast unmöglich	RE	1	2	2	0	2	0	2	2	2	0	2	0	2
		Total	-	-	-	-	-	-	-	5	6	0	6	4	6
Alarmierung	0 Kein Alarm möglich	LW	1	0	0	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2
	1 Fehlalarm teilweise möglich	SW	1	0	0	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2
	2 Fehlalarm fast unmöglich	RE	1	0	0	0	2	2	2	0	0	0	2	2	2
		Total	-							0	0	0	6	6	6
Anzahl Sensoren	0 2 Sensoren benötigt	-	2	1	1	1	0	0	0	2	2	2	0	0	0
	1 1 Sensor benötigt														
Montageaufwand	0 2 Sensoren nicht im Fensterrahmen integrierbar	-	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
	1 1 Sensor nicht im Fensterrahmen integrierbar														
	2 Alle Sensoren im Fensterrahmen integrierbar														
<b>Total</b>										<b>22</b>	<b>16</b>	<b>21</b>	<b>27</b>	<b>29</b>	<b>31</b>

#### Variante 1.1 «1 Sensor unter Fenster»

Beim stetigen Wasserzufluss (Szenario LW) hat der Sensor rechtzeitig angeschlagen. Das schnell ansteigende Hochwasser (Szenario SW) hat der Sensor jedoch nicht genügend früh erkennen können; der Sensor liegt zu hoch, als dass vor dem Wassereintritt das Fenster noch rechtzeitig schliessen könnte. Der deshalb erfolgte Wassereintritt auf die Innenseite der simulierten Kellerwand konnte aber immerhin leicht abgemindert werden. Den «normalen» Regen (Szenario RE) hat der Sensor, wie gewünscht, nicht als Gefahr «eingeschätzt», sodass eine Fehlauslösungen bei diesem Szenario nahezu ausgeschlossen ist. Beim Szenario LW wird die Möglichkeit von Fehlauslösungen als mässig eingestuft, beim Szenario SW als fast unmöglich. Da nur ein Sensor zum Einsatz kommt, nämlich Sensor 1, kann nicht alarmiert werden, denn Sensor 1 wurde so programmiert, dass er nur die Fensterschliessung auslöst, nicht aber alarmiert, wofür Sensor 2 vorgesehen ist. Wäre Sensor 1 so programmiert, dass er die Fensterschliessung und gleichzeitig Alarm auslöst, käme es häufig zu Fehlalarm, da das Wasser nicht bei jedem Zufluss in den Lichtschacht bis zur Fensteröffnung ansteigen und ins Gebäude eindringen würde. Mit nur 1 Sensor ist das System einfach und damit kosten- und wartungsfreundlich, sowie robust gegenüber Störungen. Der Montageaufwand für diese Variante ist mittelmässig, da der Sensor ausserhalb des Fensterrahmens in der Wand montiert werden muss. Auch die Kabelzuführung zum Sensor ist somit aufwändiger, da sie nicht vorgefertigt werden kann, sondern nachträglich realisiert werden muss. Insgesamt schneidet Variante 1.1 mit 26 Punkten recht gut ab.

#### Variante 1.2 «1 Sensor am unteren Rand von Fensterrahmen»

Bei dieser Variante trat Wasser nicht nur unter dem Szenario SW ins Gebäude ein - sogar in grossem Masse, sondern teilweise auch unter dem Szenario LW. Im Vergleich zu einem normalen Fenster in geöffnetem Zustand wird die Menge des eintretenden Wassers durch Variante 1.2 jedoch deutlich reduziert und somit auch die möglichen Schäden. Korrekt erkannt wurde bei dieser Variante, dass das Szenario RE keine Gefahr darstellt. Eine Fehlauslösung ist auch für die Szenarien LW und SW sehr unwahrscheinlich. Bzgl. der Kriterien «Alarmierung» und «Anzahl Sensoren» wird Variante 1.2 gleich beurteilt wie Variante 1.1. Gegenüber letztgenannter ist der Montageaufwand für Variante 1.2 jedoch deutlich

geringer, da der Sensor samt Verkabelung vorgefertigt im Fensterrahmen eingebaut werden kann. Variante 1.2 liegt in der Gesamtbeurteilung tiefer als alle Varianten und klar hinter Variante 1.1.

#### *Variante 1.3 «1 Sensor am Boden von Lichtschacht»*

Aufgrund der tiefen Lage des Sensors im Lichtschacht wurden die Wasserzuflüsse (Szenarien LW und SW) sehr früh erkannt; dadurch konnte Wassereintritt beim Szenario LW völlig verhindert werden, beim Szenario SW grösstenteils. Der Sensor hat jedoch bereits beim Szenario RE angeschlagen und das Fenster geschlossen, d.h. ein Regen wird fälschlicherweise als Gefahr interpretiert, was zu häufigem Fehlalarmen führt, auch bei den Szenarien LW und SW. Bezüglich der Kriterien «Alarmierung», «Anzahl Sensoren» und «Montageaufwand» wird diese Variante gleich beurteilt wie Variante 1.1. Insgesamt wird Variante 1.3 etwas schlechter als Variante 1.1 beurteilt, jedoch besser als Variante 1.2.

#### *Variante 2.2 «2 Sensoren, 1 unter Fenster, 1 am unteren Rand von Fensterrahmen»*

Die Beurteilung bzgl. der Verhinderung von Wassereintritt entspricht derjenigen von Variante 1.1, was damit zu erklären ist, dass der untere Sensor 1 der Variante 2.2 gleich wie in Variante 1.1 positioniert ist. Die Beurteilung bzgl. Fehlalarmen entspricht derjenigen von Variante 1.2, da die Position des oberen Sensors 2 von Variante 2.2 derjenigen in Variante 1.2 entspricht. Alarm wurde wie erwünscht erst ausgelöst, als das Wasser die Höhe des Fensters erreicht hat. Durch die Kombination der Varianten 1.1 und 1.2 lassen sich folglich deren Vorteile in Variante 2.2 nutzen. Andererseits wird diese Variante durch den Einsatz von 2 Sensoren aufwändiger und damit störungsanfälliger als die Varianten mit nur 1 Sensor. Der Montageaufwand für diese Variante ist mittelmässig, da sich nur einer der Sensoren in den Fensterrahmen integrieren lässt, während der andere an der Kellerwand vor Ort montiert und verkabelt werden muss. Insgesamt schneidet Variante 2.2 deutlich besser ab als alle Varianten mit 1 Sensor.

#### *Variante 2.3 «2 Sensoren, 1 am Boden von Lichtschacht, 1 am unteren Rand von Fensterrahmen»*

Diese Variante wurde bzgl. der Verhinderung von Wassereintritt gleich gut wie Variante 1.3 beurteilt, was auf die gleiche Position des unteren Sensors 1 zurückzuführen ist. Allerdings schliesst das Fenster bereits bei einem sehr geringen Wasserstand (Szenario RE), wenn es gar nicht nötig wäre und das Fenster zum Lüften geöffnet bleiben könnte. Bei den Szenarien LW und SW löst Variante 2.3 die Fenster-schliessung korrekt aus (wie Variante 1.2 und 2.2). Gegenüber Variante 1.3 kommt hier nach dem Fenster-schliessen ein zweiter, höher und vertikal positionierter Sensor zum Tragen, der für den Alarm zuständig ist. Da dieser direkt am unteren Fensterrahmen positioniert ist, sind Fehlalarme praktisch ausgeschlossen. Diesbezüglich, sowie bzgl. der Anzahl Sensoren und des Montageaufwands erhält Variante 2.3 gleich viele Punkte wie Variante 2.2. Die Gesamtbeurteilung von Variante 2.3 liegt sogar noch etwas höher als die von Variante 2.2.

#### 4.2.2 Bestimmung und Weiterentwicklung Bestvariante

Von den untersuchten Varianten schneidet 2.3 gemäss Tabelle 1 und der Begründung unter 4.2.1 in der Gesamtbeurteilung am besten ab. Um zu prüfen, ob dieses Resultat reproduzierbar ist, wurden für diese Variante alle Szenarien 5x durchgeführt. Alle Wiederholungen ergaben dasselbe Resultat wie die erste Durchführung. Dies spricht einerseits dafür, dass auf der Versuchsanlage reproduzierbare Versuche möglich sind, andererseits für Variante 2.3 als Bestvariante.

Der einzige Kritikpunkt bei dieser Variante ist, dass das Fenster bereits bei einem ungefährlichen Regenereignis (Szenario RE) geschlossen und die Funktion Lüften damit unnötigerweise verkürzt wird. Um dieses Problem zu beheben, wurde Variante 2.3 zur Variante 2.3+ weiterentwickelt. Hierfür wurde eine Sensorhalterung vorgesehen, welche den unteren Sensor vom Kontakt mit Wasser abschirmt, welches direkt von oben in den Lichtschacht eintritt, etwa durch Regen. Diese Sensorhalterung fungiert daher als Regenschutz. Wenn sich das Wasser jedoch im Lichtschacht anstaut und bis zur Höhe steigt, auf welcher der liegende Sensor anspricht, wird das Fenster geschlossen. Um dabei Fehlfunktionen infolge einer Luftblase unterhalb des Sensors zu verhindern, wurde der Regenschutz für den Sensor so konstruiert, dass die Luft unterhalb des Sensors vom Wasser verdrängt werden und entweichen kann. Dieser Regenschutz wurde mithilfe eines CAD-Programms (hier AutoCad) passend für den hier eingesetzten Sensor entworfen und auf einem 3D-Drucker aus dem Material PLA als Prototyp hergestellt (Abbildung 7). So konnte die Funktionalität dieser Variante 2.3+ mit Versuchen überprüft und bestätigt werden. Die weiterentwickelte Variante 2.3+ erhält daher die beste Gesamtbeurteilung aller betrachteten Varianten (Tabelle 1).

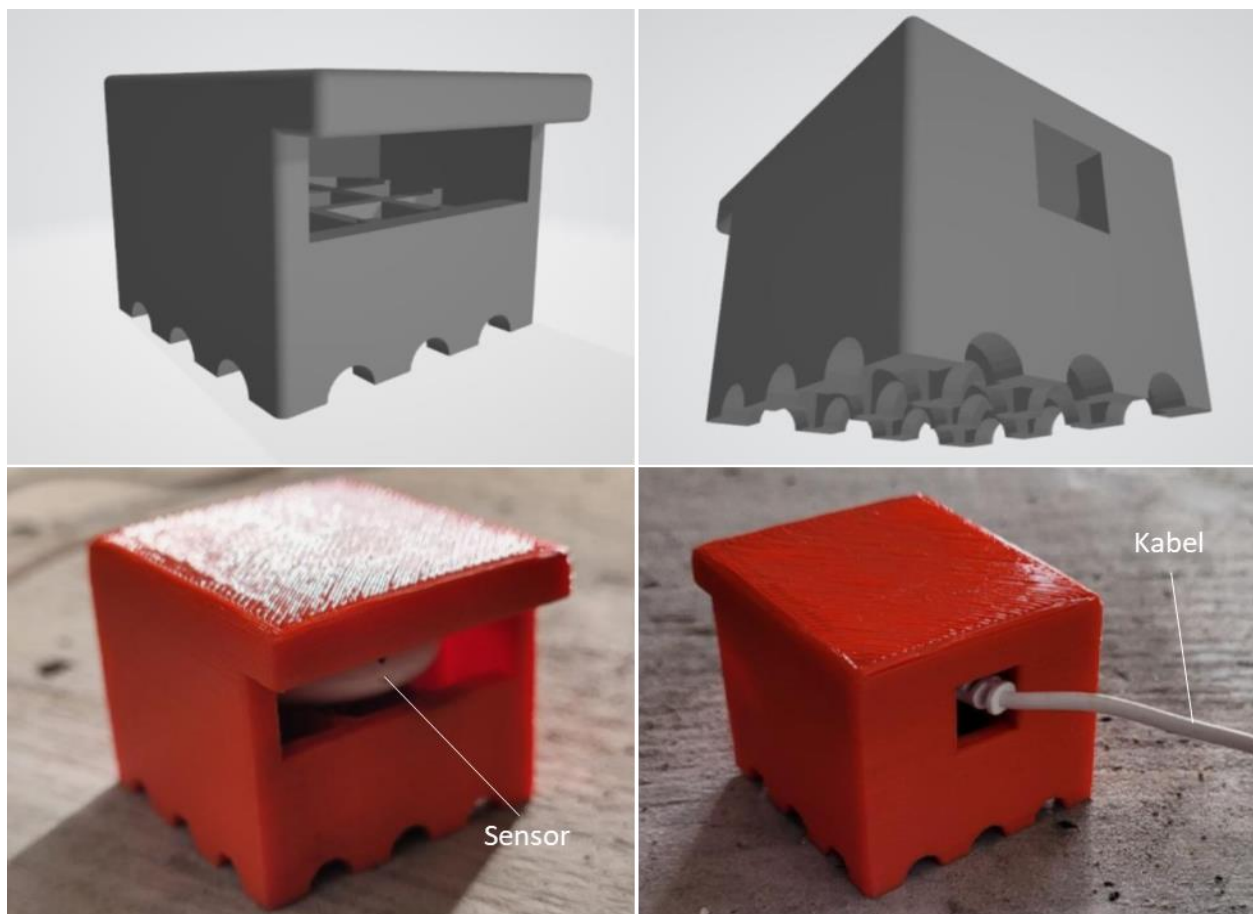


Abbildung 7. Sensorhalterung bzw. Regenschutz der Bestvariante 2.3+. Oben: 3D-Darstellungen (links: Frontseite; rechts: Rückseite); unten: Fotos eines Prototyps - hergestellt auf dem 3D-Drucker - mit dem darin platzierten Sensor (links: Frontseite; rechts: Rückseite).

## 5 Empfehlungen für die baulich/technische Umsetzung smarter Fenster im Gebäude

In Kapitel 3 wurde aufgezeigt, wie abgeklärt werden kann, ob und in welchen Fällen der Einsatz smarter Fenster als Massnahme zum Schutz vor Wassereintritt empfehlenswert ist. Trifft dies zu, so sollten für deren konkrete baulich/technische Umsetzung im Gebäude die in Kapitel 5 gegebenen Empfehlungen beachtet werden, welche auf den Erkenntnissen aus den Versuchen (Kapitel 4) basieren. Worauf beim Einsatz des Systems smartes Fenster selbst zu achten ist, wird in 5.1 dargelegt, worauf bei dessen Integration in die IT-Umgebung in 5.2.

### 5.1 System «Smartes Fenster»

Die für den Prototyp unter 4.1.1 gestellten Anforderungen an ein smartes Fenster sollen auch für die Planung und Ausführung eines serienreife Produkts als Orientierung dienen. Im Folgenden werden Empfehlungen zu den Themen Hardware, Software, Dimensionierung und Szenario Frost gegeben, welche sich aus der Entwicklung des Prototyps eines smarten Fensters in diesem Projekt ergaben, aber für ein konkretes Produkt gegebenenfalls anzupassen und/oder zu ergänzen sind.

#### 5.1.1 Hardware

Wie beim hier getesteten Prototyp können für die Wassererkennung Sensoren verwendet werden, welche durch Wasserkontakt einen elektrischen Stromkreis herstellen und damit Wasser registrieren. Wird dieser Sensortyp verwendet, welcher nur binär zwischen «Wasser vorhanden» oder «Wasser abwesend» unterscheiden kann, sollten möglichst zwei Sensoren eingesetzt und gemäss Abbildung 8 positioniert werden.



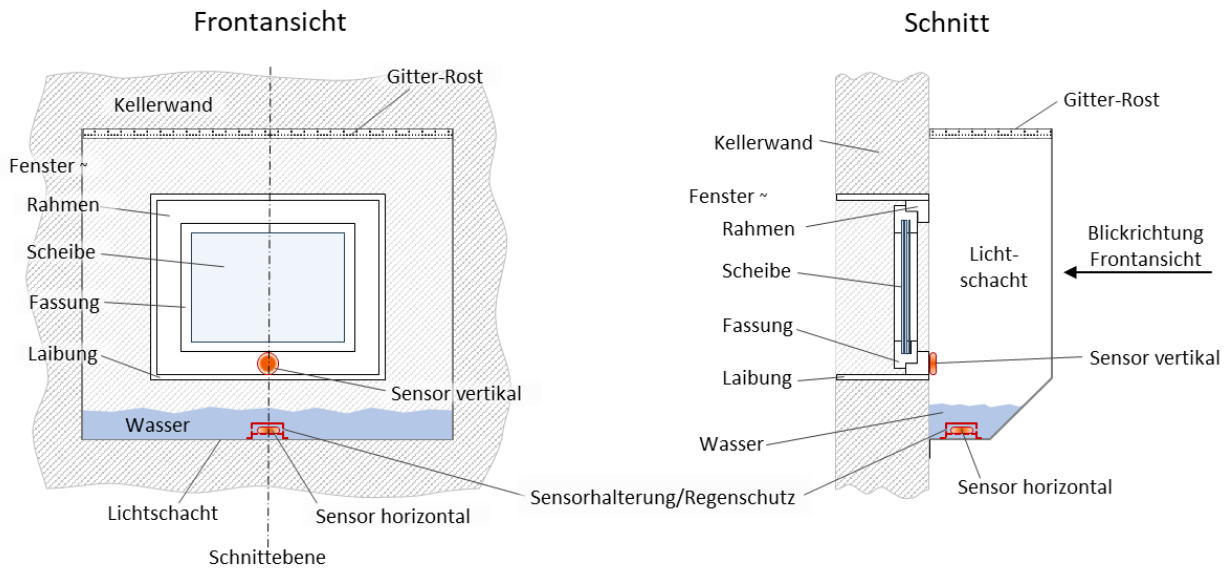


Abbildung 8. Schematische Darstellung der empfohlenen Sensorpositionen des smarten Fensters. Die Sensoren und deren Halterung wurden unverhältnismässig gross dargestellt, damit sie leichter erkennbar sind. Bei vorhandenem Abfluss im Lichtschacht müssen der Sensor und dessen Halterung am Lichtschachtboden entsprechend leicht verschoben platziert werden.

Der untere Sensor zur automatischen Steuerung der Fensterschliessung ist obligatorisch und sollte so auf dem Lichtschachtboden befestigt werden, dass er das Wasser ab einer Stauhöhe im Lichtschacht von ca. 1-2 cm erkennt und damit die Schliessung des Fensters auslöst. Durch den geringen Abstand zum Boden wird auch verhindert, dass kleine Schmutzansammlungen die Funktionalität des Systems beeinträchtigen. Grössere Verschmutzungen müssen aber trotzdem regelmässig entfernt werden, damit der Sensor nicht verschlammte. Die Halterung für den unteren Sensor (Abbildung 8) muss diesen fix positionieren, vor Regen bzw. Wasserzufluss von oben abschirmen, aber seitlich und von unten für Wasser durchströmbar sein. Die Halterung und der untere Sensor können vorgängig im Lichtschacht eingebaut werden, sodass der komplette Lichtschacht auf der Baustelle nur noch als Ganzes montiert werden muss. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Halterung und der Sensor einfach ersetzt werden können.

Optional kann ein weiterer Sensor direkt unterhalb der Gebäudeöffnung platziert werden, um einen Alarm auszulösen, wenn das Wasser ohne smarte Steuerung ins Gebäude eindringen würde. Damit lassen sich allenfalls schlimmere Schäden verhindern, sollte das smarte Fenster im Ereignisfall versagen. Dieser obere Sensor sollte direkt in den Fensterrahmen integriert werden, sodass das vorgefertigte Fenster komplett mit Sensor auf die Baustelle geliefert und mit geringem Montageaufwand eingebaut werden kann. Dabei ist jedoch wiederum darauf zu achten, dass der Sensor einfach ausgetauscht werden kann.

Ist der Lichtschacht nicht durch ein vorgefertigtes Element mit klar definiertem Boden ausgeführt, kann der untere Sensor an einer vertikalen Fläche möglichst tief unterhalb der Gebäudeöffnung platziert und mit einem Regenschutz (siehe oben) versehen werden. Bei entsprechender Dimensionierung kann das smarte Fenster auch bei einem derartigen Lichtschacht rechtzeitig vor Wassereintritt schliessen.

Alternativ zu diesen einfachen, binär ansprechenden Sensoren können auch andere eingesetzt werden, z.B. solche, welche die Höhe des Wasserstands messen, wie etwa Ultraschall- oder Drucksensoren. Diese Sensoren sind zwar teurer, aber es reicht pro Fenster bzw. Lichtschacht einer und zudem sind sie flexibler einsetzbar; denn der Schwellenwert, ab welchem die Fensterschliessung sowie ein oder weitere Alarme ausgelöst werden sollen, lässt sich einfach über die Steuerung definieren nicht, während die simplen, binär ansprechenden Sensoren dafür physisch umpositioniert werden müssen. Je nach Funktionsprinzip eines Sensortyps ist darauf zu achten, dass die Messung auch bei extremen Witterungseinflüssen funktioniert. Zudem muss bei der Wahl des Sensors die Wartung berücksichtigt werden, etwa wie häufig das Entfernen von Schmutz oder Schlamm im Lichtschacht nötig ist, um die einwandfreie Funktion des Sensors zu gewährleisten. Letzteres Problem tritt z.B. eher bei einem Drucksensor auf als bei einem Ultraschallsensor, während letzterer empfindlicher ist auf Störungen durch Tiere oder Pflanzen, welche in den Schallkegel eindringen.

Um eine zuverlässige, wartungsarme Stromversorgung zu gewährleisten, sollten die Sensoren nicht mit Batterien betrieben werden, sondern über eine abgedichtete Kabelführung von einem Verteiler im Inneren des Gebäudes mit Strom versorgt werden. Denn die Versuche am Prototyp bei Temperaturen von 0 bis 5°C zeigten, dass die Kapazität der Knopfbatterien in den Sensoren nach wenigen Monate erschöpft ist und die Batterien gewechselt werden müssten. Die Fixstromversorgung der Sensoren von der Gebäudeinnenseite kann entweder über ein Kabel durch ein abgedichtetes Loch in der Kellerwand erfolgen oder über eine wasserdichte Steckdose an der Gebäudeausseiwand. Die Elektronik der Sensoren sollte sich möglichst im Inneren des Gebäudes befinden. Draussen sind nur die Elektroden bzw. Fühler zur Wassererkennung bzw. anzuordnen. So ist die Elektronik vor Feuchtigkeit, Kälte sowie Temperaturschwankungen (insbesondere um den Gefrierpunkt) geschützt. Alternativ können Sensoren verwendet werden, die explizit für den Einsatz im Freien unter rauen Witterungsbedingungen konzipiert sind.

Da im Falle eines Unwetterereignisses, wenn das smarte Fenster unbedingt funktionieren muss, die Gefahr eines Stromausfalls besonders gross ist, sollte eine Notstromversorgung sorgfältig geprüft werden. Siehe hierzu die Ausführungen zur entsprechenden Anforderung unter 4.1.1. Dabei steht dem Vorteil der permanenten Stromversorgung die höhere Komplexität und damit Störungsanfälligkeit des Systems gegenüber und ist im Einzelfall abzuwägen.

### 5.1.2 Software

Das smarte Fenster sollte entweder als eigenständiges System oder als Teil eines Smart Homes betrieben werden können. In beiden Fällen müssen jedoch in der Software sicherheitsrelevante Parameter für die Benutzenden unveränderlich programmiert werden. Zwar läge es insbesondere bei der Integration des Systems in ein Smart Home nahe, den Benutzenden die Freiheit einzuräumen, alle Parameter mittels App per Handy nach ihren Bedürfnissen selbst einstellen zu können. Da jedoch Änderungen sicherheitsrelevanter Parameter des smarten Fensters schwerwiegende Folgen für die Sicherheit haben können und sich die meisten Benutzenden darüber nicht bewusst sind, sollte die Programmierung dieser Parameter dem Fachpersonal der Anbieterfirma vorbehalten bleiben. Ob und welche Wahloptionen den Nutzenden evtl. eingeräumt werden, sollte in erster Linie anhand der Sicherheit und erst in zweiter Linie anhand des Komforts für die Nutzenden abgewogen werden.

Während beim Betrieb des smarten Fensters als eigenständiges System die lokal eingesetzten Sensoren zur Steuerung der Fensterschliessung und -öffnung genutzt werden, wie in dieser Studie, können hierfür bei der Integration in ein Smart Home alternativ oder zusätzlich meteorologische oder hydrologische Daten verwendet werden. Da es sich hierbei um Prognosen, also wahrscheinlich künftig eintreffende Bedingungen handelt, lässt sich argumentieren, dass eine deutlich grössere Vorwarnzeit für ein gefährdendes Ereignis erreicht wird, als durch Sensorik. Andererseits kann ins Feld geführt werden, dass meteorologische/hydrologische Prognosen regional sind und von der lokalen Situation am Standort des betreffenden Gebäudes abweichen können und zudem mit einer Unsicherheit behaftet sind. Bezüglich beider Aspekte scheinen lokal mit Sensorik gemessene Daten zuverlässiger. An dieser Stelle wird ausserdem zu bedenken gegeben, dass zum Abrufen der regionalen Prognosen eine Internetverbindung nötig ist und diese unterbrochen bzw. gestört sein kann. Dieses Problem könnte bei der Nutzung von Wetter- und Hochwasserprognosen künftig gelöst werden, indem die Software so programmiert, dass das System bei Unterbruch oder Störung des Internets sofort auf die lokal gemessenen Daten zurückgreift oder das Fenster präventiv schliesst. Eine solche komplexe Steuerung sollte jedoch vor dem tatsächlichen Einsatz unbedingt sorgfältig unter allen relevanten Szenarien getestet werden.

Wenn das smarte Fenster als eigenständiges System betrieben wird, sollte auf die Abhängigkeit vom Internet komplett verzichtet werden. Denn die Unzuverlässigkeit der Internetverbindung stellt ein vermeidbares Sicherheitsrisiko dar.

Als exemplarische Grundlage zur Programmierung der Software für das smarte Fenster kann das Flussdiagramm im Anhang (Kapitel 10) als Orientierung dienen. Details wie etwa die Messperioden müssen jedoch auf das jeweilige Produkt abgestimmt und entsprechend definiert werden.

Schliesslich gilt es zu bedenken, dass das System mit zunehmender Komplexität störanfälliger und damit unzuverlässiger wird. Insofern sollte das System auf das Wesentliche, nämlich die Verhinderung von Wassereintritt, reduziert bleiben. Zusätzliche Funktionen sollten nur dann ergänzt werden, wenn die Grundfunktionen sicher beherrscht werden.

### 5.1.3 Dimensionierung

Hier wird eine mögliche Methode zur Dimensionierung des smarten Fensters aufgezeigt. Die dafür nötigen Variablen sind folgende:

- $t_f$  [m<sup>3</sup>]      Zeitdauer zum Schliessen des Fensters über Antrieb
- $t_m$  [s]        Messintervall der Sensoren
- $V_{LS}$  [m<sup>3</sup>]     Volumen des Lichtschachts bis Unterkante Fenster
- $Q_{Wmax}$  [m<sup>3</sup>/s] Maximal bewältigbarer Wasserzufluss in den Lichtschacht
- $Q_w$  [m<sup>3</sup>/s]    Zu bewältigender Wasserzufluss in den Lichtschacht

Die Schliesszeit des Fensters  $t_f$  und das Messintervall der Sensoren  $t_m$  summiert ergeben die Gesamtzeit, welche nicht unterschritten werden darf, bis das im Lichtschacht steigende Wasser die Höhe der Unterkante des Fensters erreicht hat, was dem Wasservolumen  $V_{LS}$  entspricht. Wird dieses Volumen  $V_{LS}$  auf die Zeitspanne ( $t_f + t_m$ ) bezogen, ergibt sich der technisch maximal bewältigbare Wasserzufluss  $Q_{Wmax}$  in den Lichtschacht:

$$Q_{Wmax} [\text{m}^3/\text{s}] = V_{LS} [\text{m}^3] / (t_f + t_m [\text{s}])$$

Der zu bewältigende Wasserzufluss in den Lichtschacht  $Q_w$ , den die äusseren Bedingungen vorgeben, darf höchstens so gross sein wie der maximal bewältigbare Wasserzufluss  $Q_{Wmax}$ :

$$Q_w [\text{m}^3/\text{s}] \leq Q_{Wmax} [\text{m}^3/\text{s}]$$

Anhand dieser Formeln lässt sich das smarte Fenster dimensionieren. Hierfür muss zunächst der Wasserzufluss in den Lichtschacht  $Q_w$  [m<sup>3</sup>/s] für das Bemessungsereignis abgeschätzt werden (von einem Planungsbüro oder vom Anbieter zu berechnen oder experimentell vor Ort zu bestimmen). Nun müssen die Variablen  $V_{LS}$ ,  $t_f$  und  $t_m$  derart gewählt werden, dass  $Q_{Wmax}$  mindestens gleich gross ist wie  $Q_w$ .

Diese Dimensionierung des Systems basiert auf plausiblen Annahmen. Allenfalls sind noch Sicherheitsfaktoren in Abhängigkeit von den Faktoren Klima, Hydrologie, Relief, Boden und Oberfläche am betreffenden Standort zu berücksichtigen. Um den Planenden die Dimensionierung zu erleichtern, könnten Anbieter smarter Fenster die Werte für  $V_{LS}$ ,  $t_f$  und  $t_m$  im Produktdatenblatt jeweils angeben.

Zudem wird vorgeschlagen, die Daten der ersten installierten smarten Fenster mit Datenloggern zu erfassen. Durch eine statistische Analyse dieser realen Daten liesse sich die oben aufgezeigte theoretische Dimensionierungsgrundlage überprüfen und es könnten anwendungsbezogene, standortspezifische Sicherheitsfaktoren definiert werden.

### 5.1.4 Szenario Frost

Um das System bei negativen Temperaturen funktionsfähig zu halten, wird vorgeschlagen, das Fenster prophylaktisch zu schliessen, sobald vom Wetterdienst oder von einem Temperatursensor des Smart Homes Temperaturen unter 0 °C gemeldet werden. Damit soll verhindert werden, dass die Mechanik des Fensters (inkl. Antrieb) einfriert und/oder die Sensoren vereisen, was je nach Messprinzip deren Funktionsfähigkeit beeinträchtigen kann. Ein einfacher binärer Sensor zur elektrischen Wasserdetektion, wie auf der Versuchsanlage eingesetzt, spricht bei Eis aufgrund dessen geg. Wasser geringerer elektrischer Leitfähigkeit kaum an, sodass das System bei einem vereisten Lichtschacht höchstwahrscheinlich nicht funktionieren würde. Der Einfluss von Eis und negativen Temperaturen auf die Funktionsfähigkeit des smarten Fensters und Lösungen bei Problemen sollte in einer weiterführenden Untersuchung noch genauer betrachtet werden. Wenn sich im Lichtschacht viel Eis gebildet oder Schnee akkumuliert hat, existieren diese auch bei positiven Lufttemperaturen noch und schmelzen erst allmählich. In diesem Fall würde das hier entwickelte smarte Fenster nicht funktionieren. Ein Lösungsvorschlag hierfür wäre eventuell, einen Temperatursensor direkt im Lichtschacht zu integrieren, was das System etwas teurer und komplexer macht. Je nach Standort gilt es abzuwägen, ob diese Mehrkosten pro Zeit im Verhältnis zum Risiko (= Schadenerwartungswert pro Zeit), welches auf das Szenario Eis/Schnee bei positiven Lufttemperaturen zurückzuführen ist, gerechtfertigt sind.



## 5.2 Integration des smarten Fensters in IT-Umgebung (Autorin: VKG)

### 5.2.1 Koordination mit anderen Smart Home Funktionen

Smart Home Systeme in einem Gebäude entfalten den grössten Nutzen, wenn sie möglichst viele Bedürfnisse der Bewohnenden abdecken können. Folgend sind einige heute am Markt übliche und viel verkaufte Funktionen aufgeführt:

- Steuerung von diversen Systemen am und im Gebäude wie Licht, Fenster, Geräte oder Unterhaltungssysteme
- Überwachungsfunktionen wie beispielsweise Alarmanlagen oder Überwachungskameras
- Energiemanagement im Gebäude wie beispielsweise die Storenstellung dem Sonnenstand entsprechend

In den meisten Fällen können diese Systeme über ein modernes Smartphone überwacht oder gesteuert werden. Die Daten werden häufig aus einer Cloud bezogen. Die Systeme sind in der Regel mit weiteren Komponenten erweiterbar.

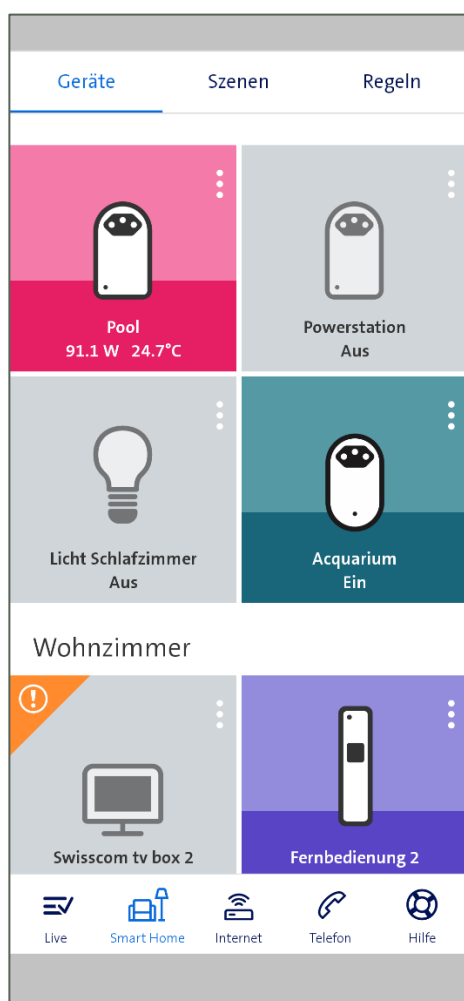


Abbildung 9 : Screenshot der Home-App von Swisscom.

Die Anzahl an Smart Home Produkten auf dem Markt ist sehr gross und unübersichtlich. Hinzu kommt, dass keine einheitlichen Standards für die Datenübertragung bestehen und viele Produkte daher nur mit den eigenen Komponenten über die eigene Software verbunden und betrieben werden können. Wenn sich eine Eigentümerin oder ein Eigentümer einmal für ein System entschieden hat, muss er in der Folge in diesem «Ökosystem» bleiben.

Die oben skizzierten Rahmenbedingungen, vor allem die fehlende Standardisierung, erschweren den breiten Einsatz von smarten Produkten für den Hochwasserschutz. Es muss festgehalten werden, dass kaum jemand ein Smart Home Produkt nur wegen einer Funktion, wie beispielsweise der Steuerung eines Kellerfensters bei Starkregen, anschaffen wird. Der Kaufentscheid wird häufig durch das breite

Angebot von verschiedenen Dienstleistungen ausgelöst. Somit sind auch die zahlreichen Hersteller an neuen Dienstleistungen für ihre Produkte interessiert. Über diesen Ansatz können Hersteller motiviert werden, eine solche «Hochwasserschutz-Funktion» in ihre Systeme zu integrieren. Hierbei müssen sie jedoch unterstützt werden. Als gutes Beispiel kann das Produkt «Hagelschutz – einfach automatisch» zum Schutz von Lamellenstoren gegen Hagel genannt werden. Dieses wurde so konzipiert, dass es für sehr viele Systeme möglich ist über eine Schnittstelle die Warnungen abzurufen.

### 5.2.2 Koordination mit Building Information Modelling (BIM)

Der Trend zu mehr Smart Home Funktionalität an Gebäuden wird von diversen weiteren, tiefgreifenden Veränderungen begleitet. Dazu gehören beispielsweise der zunehmende Einsatz digitaler Bauwerksmodelle (DBM), kollaborative Planungsmethoden (Integrierte Projektabwicklung, IPD) oder computerunterstütztes Facility Management (Computer-Aided Facility Management, CAFM).

Im Forschungsprojekt «Optimierter Gebäudeschutz vor Naturgefahren mit BIM» (OGN, 2019-2021) der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen (Fachhochschule Nordwestschweiz [FHNW] et al., 2021) wurde aufgezeigt, dass sich mit relativ einfachen Prüfmethode unter Verwendung von Standardsoftware jene Bereiche und Bauteile eines DBM identifizieren lassen, welche potenziell im Überflutungsbereich liegen. Dieser Überflutungsbereich kann beispielsweise als Volumenkörper modelliert werden ausgehend von einer maximalen Wasserkote, wo-nach er sich geometrisch mit dem DBM verschneiden lässt. Solche Modellprüfungsalgorithmen können die Planenden auf Schwachstellen und Probleme aufmerksam machen wie ungeschützte Lichtschächte und Kellerfenster. Dadurch lässt sich in einem iterativen Prozess gezielt Optimierungspotential identifizieren und die Qualität des letztlich zu erstellenden Gebäudes verbessern - auch zum Schutz gegen Naturgefahren. Wird ein ungeschützter Lichtschacht mit Kellerfenster identifiziert, kann sich der Planer dann entweder für eine Abdichtung und Erhöhung des Lichtschachts oder für den Einsatz eines Smarten Hochwasserschutzfensters entscheiden. Im letzten Fall wäre es wichtig, dass für den Betrieb relevante Information zu diesem Fenster auch in das DBM (oder ein CAFM-System) übertragen wird. Zudem wäre es aus Sicht der Vertreiber von Smart Home Hochwasserfenstern und für die Modellierer von Vorteil, wenn die Fenster in Bauproduktekatalogen wie z.B. Buildup enthalten sind. Grundsätzlich sind zusätzlich zur Schutzfunktion auch praktische Informationen bezüglich Wartung und Unterhalt abzuspeichern. So muss bei einem allfälligen Defekt am Fenster auch Jahrzehnte nach dessen Einbau die Information auftauchen, dass dieses Bauteil eine Schutzfunktion wahrnimmt und sich deshalb nicht durch ein herkömmliches Produkt ersetzen lässt. CAFM-Systeme können mit einer strukturierten Auswertung von Gebäude-, Bauteil- und Betriebsdaten dazu beitragen, dass Wartungen und Reparaturen rechtzeitig veranlasst werden und so die Funktionalität jederzeit gewährleistet wird.

### 5.2.3 Mögliche Anwendung in Smart Cities

Der Begriff Smart City wird in verschiedenen Zusammenhängen verwendet. Nach Wikipedia geht es darum für Städte gesamtheitliche Entwicklungskonzepte zu erarbeiten, so dass diese effizienter, fortschrittlicher, ökologischer und sozialer werden. Eine umfassende digitale Vernetzung ist hierbei ein zentraler Punkt. Diese digitale Vernetzung kann künftig auch im Bereich des Schutzes vor Naturgefahren eine wichtige Grundlage bilden.

Wenn zahlreiche Gebäude in einer Stadt mit Windmesser ausgerüstet sind, kann ein Netzwerk erstellt werden, in dem die Gebäude, basierend auf Windmessdaten in Echtzeit einander warnen und beispielsweise die Sonnenschutzelemente einziehen. Ein solches Vorgehen ist auch bei Wassergefahren, beispielsweise verursacht durch Starkregen, denkbar. Ein dichtes Netz von Sensoren, die Alarm schlagen, sobald sie an vordefinierten Stellen nass werden, wäre eine Basis hierzu. Basierend auf diesem Alarm, könnten dann bei anderen Gebäuden die vorinstallierten Schutzelemente automatisch geschlossen werden.

Die Basis für solche Entwicklungen ist in vielen Städten bereits vorhanden. Die bestehenden Netze für das Übermitteln von Luftmessdaten oder Parkleitsystemen könnten ebenfalls für die Übertragung von Daten und Alarmen für den Gebäudeschutz von Naturgefahren verwendet werden.

## 6 Fazit und Ausblick

Wassereintritte und Überflutungen des Kellers verursachen jedes Jahr immense Schäden an Gebäuden. Solche Gebäudeschäden liessen sich an gefährdeten Standorten mit einem smarten Fenster, welches die Gefahr von bevorstehendem Wassereintritt erkennt und sich präventiv automatisch schliesst, weitgehend vermeiden. Mit den durchgeführten Überlegungen und Versuchen im Massstab 1:1 sowie den daraus gewonnenen Erkenntnissen konnte im Rahmen dieses Forschungsprojekts eine Hilfe geschaffen werden zur Entscheidung, ob und in welchen Situationen ein solches smartes Fenster als Objektschutzmassnahme empfehlenswert ist, sowie zur Planung dessen Einsatzes.

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass das als Prototyp entwickelte und auf der Versuchsanlage getestete smarte Fenster prinzipiell funktioniert. Bei diesen Versuchen wurde erkannt, welche Herausforderungen noch bestehen bzw. welche Anpassungen noch nötig sind bis zu einem marktreifen Produkt. Insbesondere müssen die eingesetzten Sensoren sorgfältig ausgewählt und allenfalls für die Nutzung im smarten Fenster derart angepasst werden, dass sie im Freien auch bei widrigen Witterungsbedingungen (Sturm, Kälte, Hitze, Temperaturschwankungen, UV-Strahlung, Salzluf, ...) zuverlässig funktionieren. Eine weitere zu lösende Schwachstelle ist die Abhängigkeit von der Internetverbindung, wenn das smarte Fenster in ein Smart Home integriert werden soll. Aufgrund der Instabilität des Internets muss das System zu jeder Zeit auch ohne Internet autonom betrieben werden können. Nur so kann die zuverlässige Funktion im Ereignisfall sicher gewährleistet werden. Voraussetzung hierfür ist auch eine inhaltlich, zeitlich und personell klar definierte Wartung (automatisch kommuniziert durch das smarte Fenster) und die regelmässige Kontrolle eines einwandfreien Betriebs.

Dieser Schlussbericht soll dazu anregen, dass Firmen Produkte smarter Fenster auf den Markt bringen und diese zunehmend als Objektschutzmassnahme in Erwägung gezogen und bei Eignung in einer gegebenen Situation eingesetzt werden. Dabei können die Erkenntnisse aus diesem Projekt, die für Empfehlungen für die Praxis in einem Synthesebericht zusammengefasst sind, nützlich sein. Ein neues Produkt muss jedoch unbedingt vor dem realen Einsatz als Prototyp auf einer Versuchsanlage (ähnlich der hier verwendeten) im Massstab 1:1 getestet und bis zur Marktreife weiterentwickelt werden. Hierfür könnte allenfalls ein Produktstandard etabliert werden – etwa analog zur Zertifizierung von Produkten bzgl. Hagelresistenz, indem eine unabhängige Prüfstelle für smarte Fenster eingerichtet wird, welche alle neu entwickelten Produkte nach klar definierten Kriterien reproduzierbar testet und bei Eignung zertifiziert. Damit liessen sich transparente, verlässliche Bedingungen für anbietende Firmen, Gebäudeverantwortliche und Gebäudeversicherungen schaffen. Dadurch liesse sich der breite Einsatz smarter Fenster fördern und die Schäden könnten infolge Wassereintritt in Keller deutlich reduziert werden. Es wird sich zeigen, ob der Markt für eine derartige Prüfstelle gross genug ist.

Zusätzlich zu dieser konkreten Entwicklung und Prüfung von Produkten könnte in einem weiteren Schritt allgemein untersucht werden, wie sich verschiedene Sensortypen bei Vereisung oder unter Schnee verhalten und wie das Problem gelöst werden kann, um auch das Szenario Frost abzudecken. Des Weiteren wäre zu testen, inwiefern das smarte Fenster auch für dynamisches Hochwasser mit Gesschiebe ertüchtigt werden könnte. Wenn dies gelänge, wäre das smarte Fenster eine Massnahme, mit der ein Objekt bzw. Gebäude sehr effizient vor statischer und dynamischer Überflutung geschützt werden kann. Schliesslich könnten in einem weiteren Forschungsprojekt die Daten installierter smarter Fenster mit Loggern gesammelt und hinsichtlich der Grund- und variablen Disposition statistisch analysiert werden, um die Parameter des Systems standortspezifisch so einstellen zu können, dass die Funktion Lüften und die Verhinderung von Wassereintritt beide optimal erfüllt werden.

## 7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept des smarten Fensters zur Prävention von Wassereintritt in Gebäude. Gestrichelt umrandete, blass dargestellte und grau beschriftete Elemente sind optional, die anderen obligatorisch.	8
Abbildung 2: Entscheidungsbaum für die Auswahl von Massnahmen – inkl. dem smarten Fenster – zum Schutz vor Hochwasser und Oberflächenabfluss. * «Tief liegend» bedeutet hier, dass die Unterkante der Gebäudeöffnung unterhalb des Wasserspiegels bei grösstmöglicher Überflutung liegt. ** Gemäss der SIA-Norm 261/1 sind bis zu einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren stets permanente Schutzmassnahmen vorzusehen.	9
Abbildung 3. Funktionsskizze der Versuchsanlage zur Entwicklung des Prototyps eines smarten Fensters.	12
Abbildung 4. Realisierte Versuchsanlage mit Komponenten auf Innenseite der nachgebildeten Kellerwand.	13
Abbildung 5. Realisierte Versuchsanlage mit Komponenten auf Aussenseite der nachgebildeten Kellerwand. Blick von oben (links), Blick auf Aussenwand (rechts).	14
Abbildung 6. Varianten des smarten Fensters durch systematische Variation der Anzahl Sensoren zur Wasserdetektion (1 oder 2) sowie deren Position im Lichtschacht. Die Sensoren wurden unverhältnismässig gross dargestellt, damit sie leichter erkennbar sind. Variante 2.1 wurde nicht getestet, was im Text begründet wird.	15
Abbildung 7. Sensorhalterung bzw. Regenschutz der Bestvariante 2.3+. Oben: 3D-Darstellungen (links: Frontseite; rechts: Rückseite); unten: Fotos eines Prototyps - hergestellt auf dem 3D-Drucker - mit dem darin platzierten Sensor (links: Frontseite; rechts: Rückseite).	20
Abbildung 8. Schematische Darstellung der empfohlenen Sensorpositionen des smarten Fensters. Die Sensoren und deren Halterung wurden unverhältnismässig gross dargestellt, damit sie leichter erkennbar sind. Bei vorhandenem Abfluss im Lichtschacht müssen der Sensor und dessen Halterung am Lichtschachtboden entsprechend leicht verschoben platziert werden.	21
Abbildung 9 : Screenshot der Home-App von Swisscom.	24

## 8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Beurteilung der untersuchten Varianten durch Punktevergabe nach gewichteten Kriterien, teils für unterschiedliche Szenarien (LW bzw. SW = langsamer bzw. schneller/schwallartiger Wasseranstieg im Lichtschacht, RE = Beregnung des Lichtschachts). Die Varianten sind in 4.1.3 definiert und in Abbildung 12 dargestellt. Wie in 4.1.3 begründet, wurde Variante 2.1 nicht getestet und ist daher hier nicht aufgeführt. Variante 2.3+ wurde erst nach Auswahl der Bestvariante unter den zunächst untersuchten Varianten 1.1, 1.2, 1.4, 2.2 und 2.3 entwickelt und dann ebenfalls auf der Versuchsanlage getestet.

---

18

## 9 Literaturverzeichnis

- Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2020). *Integrales Risikomanagement*. Abgerufen von [Integrales Risiko-  
management \(admin.ch\)](https://www.admin.ch/gov/de/section/04600/index.html?id=13632)
- Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg (HEIA-FR), Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW), IDC AG, Waldhauser+Hermann AG, HxGN Schweiz AG. (2021). *Optimierter Gebäudeschutz vor Naturgefahren mit BIM (OGN)*. Muttenz: Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW). Abgerufen von [optimierter-gebaeudeschutz-vor-naturgefahren-mit-bim-ergebnisbericht.pdf \(vkg.ch\)](https://www.vkg.ch/optimierter-gebaeudeschutz-vor-naturgefahren-mit-bim-ergebnisbericht.pdf)
- Jordi, M. (2018). *Windschutz - einfach vernetzt*. Luzern: Institut für Kommunikation und Führung.
- Schutz vor Naturgefahren [Webseite]. (2023). Abgerufen von [schutz-vor-naturgefahren.ch](https://www.schutz-vor-naturgefahren.ch)
- SIA 261/1 [Norm]. (2020). *Einwirkungen auf Tragwerke - Ergänzende Festlegungen*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- SIA 4002 [Norm]. (2020). *Hochwasser - Wegleitung zur Norm SIA 261/1*. Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- SRF Meteo. (2016). *Hagel-Vorwarnung*. Zürich: Schweizer Radio und Fernsehen (SRF). Abgerufen von [Projekt Detailkonzept \(vkg.ch\)](https://www.srf.ch/projekt-detailkonzept)
- Vereinigung Kantonalen Gebäudeversicherungen. (2023). *Schutz vor Naturgefahren*. Abgerufen von [Elektriker/ Architekten/ Planer - Hagelschutz - einfach automatisch \(hagelschutz-einfach-automatisch.ch\)](https://www.elektriker-architekten-planer-hagelschutz-einfach-automatisch.ch)
- Vereinigung Kantonalen Gebäudeversicherungen. (2022). *Elementar*. Abgerufen von [Elementar | Vereinigung Kantonalen Gebäudeversicherungen \(VKG\)](https://www.vkg.ch/elementar)
- VSS 40350 [Norm]. (2019). *Oberflächenentwässerung von Strassen; Regenintensitäten*. Zürich: Vereinigung Schweizer Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS). Abgerufen von [VSS-Shop - Mobilityplatform](https://www.vss-shop.ch/mobilityplatform).

# 10 Anhang

Vorschlag Flussdiagramm zur Steuerung des «smarten Fensters»

