



Konstruktion. Für die dehnungsbezogene Auslegung von Filmscharnieren werden Berechnungsformeln angegeben, die die bisher bekannten Anwendungsmöglichkeiten wesentlich erweitern. Die Formeln sind anhand einer vergleichenden FEM-Analyse entwickelt und an Praxisbeispielen erprobt worden.

**JOHANNES KUNZ
SIMON BACHMANN
MARIO STUDER**

Filmgelenke (auch Filmscharniere genannt) sind typische Elemente kunststofforientierter Konstruktionsprinzipien, vor allem der Integralbauweise. Sie verbinden als elastische Bindeglieder zwei zueinander bewegliche Partien thermoplastischer Formteile. Verbindungstechnisch sind sie als teilweise beweglich, unlösbar und stoffschlüssig zu charakterisieren. Sie bestehen im Wesentlichen aus einer Gelenkrille mit stark verjüngtem Querschnitt gegenüber den angrenzenden Formteilmitteln (Bild 1). Diese Verjüngung auf einige Zehntelmillimeter gestattet bei ausreichend verformungsfähigen Werkstoffen eine relativ große Verformung bei geringem Kraftaufwand [1].

Filmgelenke werden zusammen mit den zueinander beweglichen Formteilmitteln in der Regel während des Urformens hergestellt, zumeist durch Spritzgießen, seltener durch Extrudieren oder Extrusionsblasformen. Ein nachgeschalteter Prägeprozess zur Erzielung der endgültigen Gelenkgeometrie bildet eher die Ausnahme.

Dehnung als Auslegungskriterium

Filmgelenke werden primär auf Biegung beansprucht. Biegewinkel sowie Zahl und Frequenz der Betätigungen eines Filmscharniers bestimmen dessen geometrisch-konstruktive Auslegung und die Werkstoffwahl aufgrund der relevanten mechanischen Eigenschaften. Entscheidend ist hierbei die maximale Dehnung ϵ_b im gebogenen Gelenk, sei es

für eine quasistatische Belastung oder unter Biegewechselbeanspruchung, im Vergleich zur Verformbarkeit der Werkstoffe. Es ist daher naheliegend, bei der Auslegung von der Verformungsbedingung

$$\epsilon_b \leq \epsilon_{zul} = \epsilon_G \cdot \frac{1}{S} \quad (1)$$

auszugehen (zul = zulässig).

Die zulässige Dehnung wird darin durch den maßgeblichen Dehnungsgrenzwert ϵ_G und den Sicherheitsfaktor S bestimmt. Beide Größen hängen von der Funktion des Filmgelenks ab. Bei hohen Biegezahlen sollte die im Biegewechselversuch ermittelte, von der Frequenz und der Schwingspielzahl N abhängige ertragbare Dehnungsamplitude $\epsilon_A(N)$ des Kunststoffes mit einer Sicherheit $S \geq 1,2$ nicht überschritten werden. Für geringe Biegezahlen bis maximal etwa 100 Betätigungen stellt die Streckdehnung ϵ_S die Grenze dar, wobei als Sicherheit $S \geq 1,0$ ausreicht. Filmgelenke für ganz wenige Betätigungen, etwa bei der Montage, können mit der Reißdehnung ϵ_R und einer Sicherheit $S \geq 1,5$ ausgelegt werden, wobei jedoch mit Verstreckungen und je nach Werkstoff mit Weißbruch zu rechnen ist. Für einige gebräuchliche Werkstoffe, allen voran PP, finden sich die Größen der erwähnten

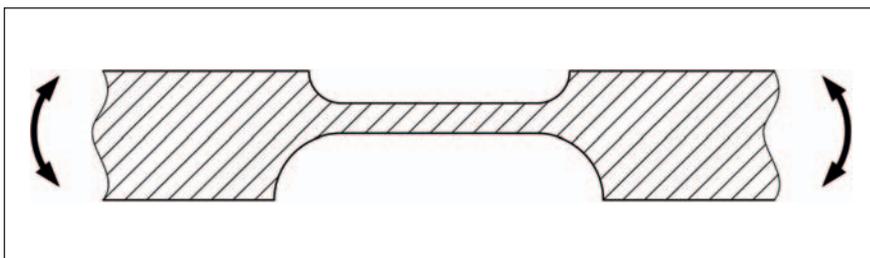


Bild 1. Grundform eines Filmscharniers (schematisch)

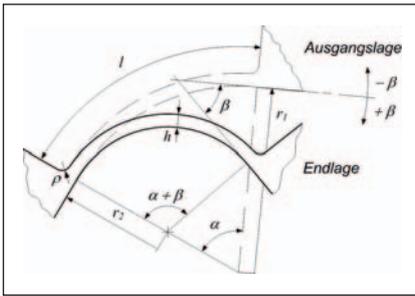


Bild 2. Geometrische Verhältnisse am idealisierten Filmgelenk (nach [2])

- h : Dicke des Filmgelenks [mm]
- l : Länge des Filmgelenks [mm]
- r_1 : Krümmungsradius in Ausgangslage [mm]
- r_2 : Krümmungsradius in Endlage [mm]
- ρ : Rundungsradius am Übergang [mm]
- α : Ausgangswinkel [rad]
- β : Biegewinkel [rad]

Dehnungsgrenzwerte in der einschlägigen Literatur [1–4].

Einfache Dehnungsberechnung

Die Dehnung ε_b in der Randfaser eines gebogenen Filmgelenks kann unter idealisierenden Annahmen einfach berechnet werden. Bisher bekannt gewordene Theorien gehen von einem Filmgelenk konstanter Dicke h über der Länge l aus, dessen Mittellinie in der Ausgangslage kreisförmig sein kann. Wird weiter angenommen, dass beim Biegen um den Winkel β diese Kreisform grundsätzlich erhalten und die Länge l konstant bleiben, so ändert sich lediglich der Krümmungsradius r . Bezeichnet α den Winkel in der Ausgangslage, so gelten die folgenden geometrischen Zusammenhänge (Bild 2), wobei die Winkel im Bogenmaß [rad] zu messen sind:

Ausgangslage:

$$l = r_1 \cdot \alpha \quad (2)$$

$$l_1 = \left(r_1 + \frac{h}{2}\right) \cdot \alpha = l + \frac{h}{2} \cdot \alpha \quad (3)$$

Endlage:

$$l_2 = \left(r_2 + \frac{h}{2}\right) \cdot (\alpha + \beta) = l + \frac{h}{2} \cdot (\alpha + \beta) \quad (4)$$

Längenänderung auf der Zugseite infolge Biegung:

$$\begin{aligned} \Delta l &= l_2 - l_1 \\ &= \left[l + \frac{h}{2} \cdot (\alpha + \beta)\right] - \left[l + \frac{h}{2} \cdot \alpha\right] = \frac{h}{2} \cdot \beta \quad (5) \end{aligned}$$

Der Biegewinkel β wird dabei positiv gerechnet, wenn die Krümmung des Filmgelenks bei der Biegung zunimmt,

d. h. enger wird, und negativ, wenn das Filmgelenk gestreckt wird.

Randfaserdehnung auf der Zugseite, berechnet mit (5), (3) und (2):

$$\begin{aligned} \varepsilon_b &= \frac{\Delta l}{l_1} = \frac{h}{2} \cdot \beta \cdot \frac{1}{\left(r_1 + \frac{h}{2}\right) \cdot \alpha} \\ &= \frac{h}{2 \cdot \left(1 + \frac{h}{2 \cdot r_1}\right) \cdot l} \cdot \beta \quad (6) \end{aligned}$$

Dieser Ansatz basiert auf der technischen Definition der Dehnung. Die großen zu erwartenden Verformungen würden eigentlich die Bestimmung der wahren Dehnung rechtfertigen, bei der die Längenänderungen nicht auf die Ausgangslänge bezogen werden, sondern auf die jeweils aktuelle Länge. Zwecks einfacher Handhabbarkeit der Formeln in der Praxis wird jedoch auf diese genauere Betrachtungsweise verzichtet.

Bei gerader Mittellachse in der Ausgangslage des Gelenks mit $r_1 \rightarrow \infty$ und $\alpha = 0$ wird der zweite Summand in der

Klammer von Beziehung (6) Null, und es bleibt

$$\varepsilon_b = \frac{h}{2 \cdot l} \cdot \beta \quad (7)$$

Ist die Mittellachse bereits in der ungebogenen Ausgangslage gekrümmt, so stellt (7) zumindest eine gute Näherung dar. Denn in der Praxis ist zumeist die Filmstärke h sehr viel kleiner als $2 \cdot r_1$, und der zweite Term in der Klammer (6) kann gegenüber der Größe 1 vernachlässigt werden.

Diese Theorie ist zwar sehr einfach; sie hat jedoch nebst dem Vorbehalt der ideal kreisförmigen Krümmung auch den gewichtigen Nachteil, dass sie sich auf Filmgelenke beschränkt, deren Dicke h auf einer gewissen Länge l konstant ist. Bei $l = 0$ liefert Beziehung (7) gar eine unendlich hohe Dehnung, sodass sie auf diesen Fall ohnehin nicht anwendbar ist. Darüber hinaus vernachlässigt diese Theorie den Einfluss der Endpartien im Bereich des Übergangs zum Formteil. Je kürzer die Zwischenlänge l ist, umso

Geometrie	Bemerkungen
a)	
b)	
c)	$\rho_l = \frac{l}{2} \cdot (\rho_{la} + \rho_{lb})$
d)	Mit $\rho_2 \rightarrow \infty$ in a) enthalten $\rho_1 \geq \rho_2$
e)	Mit $\rho_2 \rightarrow \infty$ in b) enthalten $\rho_1 \geq \rho_2$

Bild 3. Untersuchte allgemeinere Geometrien von Filmgelenken [7, 8]

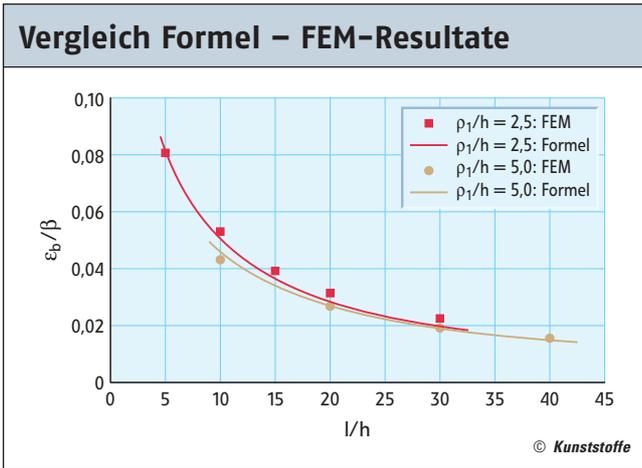


Bild 4. Gegenüberstellung von Resultaten mit FEM und Formel (11) für $\rho_2 \rightarrow \infty$ und $\beta = \pi/2$

kel und umgekehrt proportional zu einer Ersatzlänge l^* zunimmt, die den oben erwähnten Anteil der gerundeten Übergänge erfasst. Interessant ist, dass diese Ersatzlänge für alle untersuchten Geometrien aufgrund der FEM-Ergebnisse mit guter Genauigkeit durch die einzige Beziehung

$$l^* \approx \left(0,68 + 0,83 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \right) \cdot \sqrt{h \cdot \rho_1} + 0,75 \cdot l \tag{8}$$

ausgedrückt werden kann (Bild 4). Darin ist $0 < \rho_1 < \infty$ immer der Radius auf der Zugseite. Der Radius $\rho_2 > 0$ auf der Druckseite kann dagegen unendlich groß sein (Bilder 3a, b, c), was zu

$$l^* \approx (0,68 + 0,83) \cdot \sqrt{h \cdot \rho_1} + 0,75 \cdot l = 1,51 \cdot \sqrt{h \cdot \rho_1} + 0,75 \cdot l \tag{9}$$

führt. Zu beachten bleibt bei beidseitiger Anordnung der Gelenkrille (Bilder 3d, e), dass der maximal mögliche Biegewinkel aus geometrischen Gründen deutlich unter 180° liegt. Die Standardabweichung über alle FEM-Resultate beträgt 9,4 %. Bei den Modellen ohne Zwischenlänge l (Bilder 3a, c, d) liegt sie bei 4,2 %. Eine genauere mathematische Beschreibung wäre möglich, ginge allerdings auf Kosten der Einfachheit der Formel.

Die Beziehungen (8) und (9) können ohne Abstriche an der Genauigkeit auch auf Fälle mit abgeschrägten Flanken beidseitig der Radien angewendet werden. Sind die Zwischenlängen beidseitig verschieden lang, so ist die kleinere Länge maßgebend. Bei asymmetrischer Rundung und mit $\rho_2 \rightarrow \infty$ (Bild 3c) ergeben sich mit dem arithmetischen Mittel

$$\rho_1 = \frac{1}{2} \cdot (\rho_{1a} + \rho_{1b}) \tag{10}$$

der beiden Radien auf der Zugseite gute Resultate [7].

Die für die Auslegung maßgebende größte positive Dehnung tritt erwartungsgemäß im Zugbereich des gebogenen Filmgelenks an der jeweils dünnsten Stelle auf. Sie kann mit guter Genauigkeit durch (7) beschrieben werden, wenn für die Länge l die Ersatzlänge l^* gemäß (8) bzw. (9) gesetzt wird. Damit gilt schließlich

$$\varepsilon_b \approx \frac{h}{2 \cdot l^*} \cdot \beta = \frac{1}{\left(1,36 + 1,66 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{h}} + 1,50 \cdot \frac{l}{h}} \cdot \beta \tag{11}$$

wichtiger wird aber der geeignete Einbezug der gerundeten Übergänge in die Biegung des Gelenkfilms.

Entwicklung einer allgemeineren Theorie

Wegen dieser gewichtigen Nachteile ergab sich das Bedürfnis nach einer Berechnungsformel, die bei $l = 0$ zu realistischen Resultaten führt und allgemeinere Geometrien mit einschließt, wie sie gebräuchlich sind [1, 5, 6]. Dabei war klar, dass sich eine entsprechende Theorie nicht so einfach analytisch entwickeln lassen dürfte. Aus diesem Grunde bot sich an, auf bewährte Weise kombiniert theoretisch-analytisch und rechnerisch-numerisch vorzugehen. Die wesentlichen Schritte dabei waren:

- Identifikation der maßgeblichen Parameter des Problems anhand qualitativer Überlegungen,
- rechnerisch-numerische Analysen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) unter gezielter Variation der Parameter zwecks Herausarbeitung der geltenden Gesetzmäßigkeiten,
- Bestätigung der Ergebnisse anhand einfacher Vergleichsgeometrien (Referenzrechnungen),

- Erarbeiten von mathematisch möglichst einfachen, aber hinreichend genauen Berechnungsformeln,
- Anwendung auf praktisch realisierte Filmgelenke.

Die Überlegungen gingen von der Vorstellung aus, dass ein gewisser Anteil der gerundeten Übergänge an der Biegung teilnimmt, und dass dieser Anteil primär eine Funktion der Verhältnisse ρ/h und l/h ist. Die Untersuchung konzentrierte sich somit darauf, die maximale Dehnung der Filmgelenke in Abhängigkeit der Geometrieparameter zu ermitteln und die Korrelation möglichst einfach und doch hinreichend genau zu beschreiben. Einbezogen wurden fünf Geometrien (Bild 3), drei mit einseitiger und zwei mit beidseitiger Anordnung der Gelenkrille, die die praktisch denkbaren Fälle weitgehend abdecken.

Für die FEM-numerischen Untersuchungen wurde angenommen, dass sich der Kunststoff linear viskoelastisch verhält. Obwohl in Filmgelenken in Wirklichkeit in aller Regel der nichtlineare Verformungsbereich erreicht wird, dürfte sich diese idealisierende Annahme auf die Resultate nur marginal auswirken, da die Dehnungen aus Änderungen der Geometrie hervorgehen und damit praktisch werkstoffunabhängig sind. Da die Poissonzahl die maximale Dehnung erfahrungsgemäß nur unwesentlich beeinflusst, wurde sie in allen FEM-Rechnungen mit dem Wert $\mu = 0,45$ eingesetzt.

Ergebnisse

Die Untersuchungen in den Parameterbereichen $0 \leq l/\rho_1 \leq 8$; $0,09 \leq \rho_2/(\rho_1 + \rho_2) \leq 1,0$; $0 \leq l/h \leq 40$ und $0 \leq \beta \leq 180^\circ$ zeigten, dass die Dehnung aller untersuchten Geometrien proportional zum Biegewin-

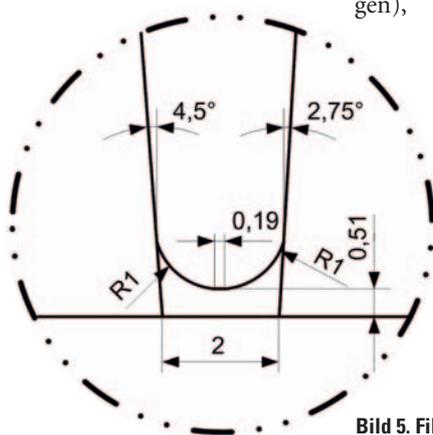


Bild 5. Filmgelenk aus PP (Grafik: Geberit International AG)

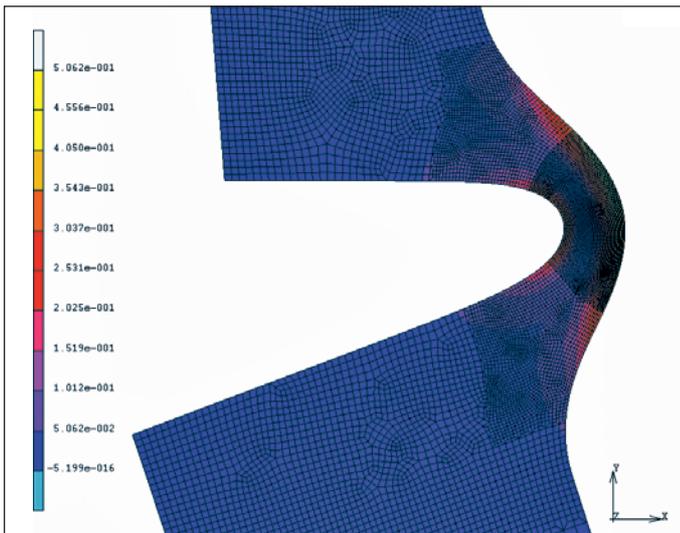


Bild 6. FEM-Bestimmung der Dehnung am Filmgelenk aus PP:
 $\epsilon_{max} = 0,506 = 50,6\%$ [7]

Die Anwendung der neu entwickelten Formeln auf ein realisiertes Filmgelenk aus PP (Bild 5), das weitgehend einer untersuchten Grundgeometrie entspricht (Bild 3b), ergibt bei einem Biegewinkel $\beta = 160^\circ$ eine maximale Dehnung von 50,3 %, im Vergleich zu 50,6 % Dehnung in der FEM-Analyse (Bild 6). Die Ergebnisse der FEM-Analyse können als verlässliche Vergleichsbasis angesehen werden, stimmen sie doch mit der Wirklichkeit qualitativ gut überein, was sich in der verformten Gelenkgeometrie sehr schön zeigt (Bild 7).

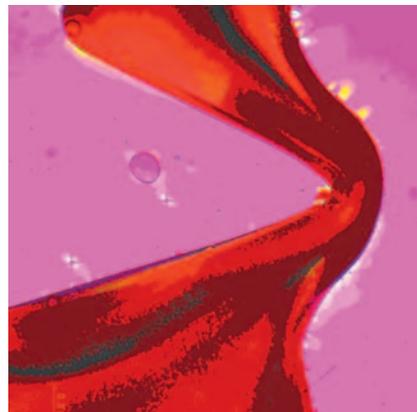


Bild 7. Schliffbild des gebogenen Filmgelenks aus PP [7]

Werden Filmgelenke mit einseitiger Gelenkkrille (Bilder 3a, b, c) so gebogen, dass die Gelenkkrille auf der Druckseite liegt, werden die maximalen Dehnungen beidseitig reduziert. Der höchstmögliche Biegewinkel liegt dann geometrisch bedingt deutlich unter 180° . Punktuelle FEM-Rechnungen haben auf der Zugseite Verminderungen um bis zu 20 % ergeben. Die Formeln (8) bis (11) können in einem solchen Fall allenfalls als grobe Näherung dienen, die auf die sichere Seite der Verformungsbedingung (1) führt.

Fazit

Die hier entwickelten Formeln ermöglichen es, die maximalen Dehnungen der häufigsten Filmgelenk-Geometrien (Bild 3) rasch und mit hinreichender Genauigkeit für die Auslegung zu berechnen, selbst für Filmgelenke, deren Mittelachse bereits in der ungebogenen Ausgangslage gekrümmt ist. Sie ersparen damit aufwendigere FEM-Analysen. Allerdings vermögen sie ebenso wenig wie diese, Krümmungsüberhöhungen infolge von Gefügeeinflüssen zu erfassen, wie sie bei der Verarbeitung entstehen können [9]. Solche Einflüsse sind bei der Aus-

legung anhand der Verformungsbedingung (1) mit entsprechend erhöhten Sicherheitsfaktoren S zu berücksichtigen.

Aus den mit (11) berechneten Dehnungen kann in der Regel nicht verlässlich auf die Biegemomente und die Normalspannungen in den Randfasern geschlossen werden, und zwar wegen des in Wirklichkeit nichtlinearen Verformungsverhaltens der Werkstoffe. Dieses erschwert auch die Überlagerung eventueller Zugbeanspruchungen mit entsprechender Verschiebung der neutralen Achse. Hiefür wären FEM-Analysen mit nichtlinearen Materialgesetzen erforderlich. Einzig bei Filmgelenken mit sehr kleinem Biegewinkel dürften die Verformungen im linearen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve liegen, sodass Randfaserspannungen und Biegemoment mit der bekannten Biegetheorie berechnet werden können. ■

DANK

Die vorliegende Arbeit entstand mit freundlicher Unterstützung der Geberit International AG, Jona, im Rahmen des Forschungsprojekts „Grundlagen für die

Auslegung von Kunststoffkonstruktionen“. Für dessen Förderung danken die Verfasser der Gebert Rüt Stiftung, Basel, und dem Forschungsfonds der HSR Hochschule für Technik Rapperswil.

LITERATUR

- 1 Kunz, J.: Filmgelenke. In: Kunz, J., Michaeli, W., Herrlich, N., Land, W. (Hrsg.): Kunststoffpraxis: Konstruktion. Weka Media, Kissing, Aktualisierungsstand Oktober 2007
- 2 N. N.: Filmgelenke aus technischen Kunststoffen. Hoechst AG, Firmenschrift B.3.5, Frankfurt/Main 1990
- 3 Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen. 3. Aufl., Carl Hanser Verlag, München 2005
- 4 Ehrenstein, G. W.: Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik. Carl Hanser Verlag München, 2004
- 5 Tres, P. A.: Designing Plastic Parts for Assembly. 4th Ed., Carl Hanser Verlag, München 2000
- 6 Rotheiser, J.: Joining of Plastics. 2nd Ed., Carl Hanser Verlag, München 2004
- 7 Bachmann, S.: Beanspruchung des Kunststoffs in Filmgelenken in Abhängigkeit von Geometrie und Herstellungs-Parametern. Diplomarbeit HSR Hochschule für Technik Rapperswil, 2005
- 8 Kunz, J., Bachmann, S., Studer, M.: Forschungsprojekt Auslegung von Kunststoffkonstruktionen. Diverse interne, unveröffentlichte Dokumente. HSR Hochschule für Technik Rapperswil, 2006
- 9 Naundorf, I.: Morphologie und mechanisches Verhalten von Filmscharnieren aus Kunststoff. Diss. Stuttgart, 1998

DIE AUTOREN

PROF. DIPL.-ING. JOHANNES KUNZ, geb. 1940, Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) an der HSR Hochschule für Technik Rapperswil, Schweiz; jkunz@hsr.ch

DIPL.-ING. SIMON BACHMANN, geb. 1981, Geberit International AG, Jona/Schweiz; simon.bachmann@geberit.com

DIPL.-ING. MARIO STUDER, geb. 1980, ETH Zürich, vormals wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWK



Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung

Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK)
 HSR Hochschule für Technik Rapperswil
 Oberseestrasse 10, Postfach 1475
 CH-8640 Rapperswil
 T +41 (0)55 222 47 70
 F +41 (0)55 222 47 69
 iwkw@hsr.ch
 www.iwk.hsr.ch