

In-situ-Auslegungsmethode für Kapillaren

Bernhard Vetsch^{*,1}, Tobias Menzi¹,
Slawomir Rysiewicz², Adrian H. Bachmann²

¹ThermodynamX GmbH, Straubstrasse 11, 7323 Wangs, Schweiz
b.vetsch@thermodynamx.ch
t.menzi@thermodynamx.ch

²V-ZUG Kühltechnik AG, Zelgstrasse 3, 9320 Arbon, Schweiz
adrian.bachmann@vzug.com
slawomir.rysiewicz@vzug.com

* Korrespondenzautor

Kurzfassung

Beim Kältekreis von Massenprodukten, wie Haushaltskühlschränken und Klimageräten, ist die Kapillare als Drosselorgan in der Regel die erste Wahl. Bislang geht dieser Entscheid mit einem erhöhten Entwicklungsaufwand einher, da die Auslegung der Kapillare nicht trivial ist. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn das verbundene System über einen breiten Arbeitsbereich zuverlässig und effizient funktionieren soll. Während des Entwicklungsprozesses kann das System beispielsweise mit einer auswechselbaren Kapillarsektion ausgestattet sein. In der Praxis weisen die bekannten Methoden jedoch Nachteile auf, wie signifikante Füllmengenänderung, schwieriges Handling, lange Rüstzeiten oder hoher Bedarf an Infrastruktur.

Diese Publikation stellt eine neuartige in-situ-Methode zur Auslegung und Verifikation der Kapillare vor und demonstriert deren Einsatz an zwei Beispielen aus der Praxis. Ersteres wendete die Methode an, um Auswirkung von Kapillarentoleranzen auf das Betriebsverhalten eines Kühlschranks zu ermitteln. Es handelt sich hierbei um einen Test, welcher ohne den vorgestellten Ansatz kaum belastbare Ergebnisse liefern könnte.

Am zweiten Beispiel wird die klassische Anwendung des Equipments zur Spezifikation der Drosselkapillare in einem Kleinkältekreis mit brennbarem Kältemittel veranschaulicht. Dank der neuen Methode wurde die Ermittlungszeit um circa Faktor 5 reduziert.

Stichwörter:

Kapillare, Kapillarenauslegung, Durchflussvariation, Durchflussbestimmung

1 Einleitung

Meist mehrere Meter lang, mit einem Innendurchmesser von weniger als einem Millimeter: Die Kapillare ist als Drosselorgan eine Kernkomponente im Kältekreis und genauso wichtig, wie der Kompressor. Sie trumpft mit attraktiven Eigenschaften auf: Das Rohr ist kostengünstig, arbeitet passiv, ist robust und gut reproduzierbar. Durch seinen Druckabfall stellt es im Kältekreis auf simple Weise das benötigte Niveau der Verdampfungstemperatur und den Kältemittelmassenstrom ein. Die Modellierung der physikalischen Vorgänge in der Kapillare während deren Durchströmung mit Kältemittel ist hochkomplex. Bisher ist es nicht möglich, mit einer allgemeingültigen Korrelation die benötigten oder gewünschten Parameter für eine Kapillare in zufriedenstellender Genauigkeit zu berechnen.

Das Kältemittel tritt in flüssiger Form in die Kapillare ein und es entsteht in Fließrichtung ein Druckabfall. Dieser führt schliesslich zum Übertritt des Kältemittels in den Zweiphasendom. Es bilden sich Gasblasen, welche die Strömungsgeschwindigkeit erhöhen und zu weiterem Druckabfall führen, wodurch die Gasblasenbildung weiter zunimmt - eine Selbstverstärkung, die erst beim Austritt aus der Kapillare endet.

Man ist bei der Berechnung dieser Zustandsänderungen schnell mit den Themen Fanno-Kurve, Überschallströmungen, Flow Regimes und deren Änderung konfrontiert. Wobei das mitzirkulierende Öl noch gänzlich unberücksichtigt bleibt.

Es gibt empirische und semi-empirische Modelle, welche in gewissen Grenzen angewendet werden können, aber ungültig werden, wenn sich die Randbedingungen ändern. Hat man dann in der Praxis – und dies kommt in den meisten Fällen vor – noch einen internen Wärmetauscher integriert, dann scheitert auch das aktuell beste Modell.

Für einen effizienten Entwicklungsprozess ist dies eine höchst unbefriedigende Ausgangslage, denn man ist auf die experimentelle Ermittlung der Kapillarenparameter – im Sinne von Länge und Innendurchmesser – angewiesen. Die Restriktivität der Kapillare hängt stark von der Kältemittelfüllmenge ab. Selbst wenn eine Unterkühlung sichergestellt ist, erzeugt zusätzliche Füllmenge einen höheren Kondensationsdruck, wodurch eine Erhöhung des Massenstroms und der Verdampfungstemperatur resultiert.

Kältekreise mit eingebauter Kapillare sind in der Regel sehr kompakt. Beim Kühlschranks befindet sie sich sogar mehrheitlich eingeschäumt in der isolierenden Kavität zwischen Innenraum und Aussengehäuse. Darüber hinaus ist die Füllmenge solcher Kältekreisläufe sehr gering. Es ist aus verschiedensten folgenden Gründen nicht praktikabel, die Kapillare iterativ durch Ein- und Ausbau von verschiedenen Längen und Durchmessern zu ermitteln.

- Kältemittel im Öl
- Verstopfungen
- Zugänglichkeit
- Konsistente Kältemittelfüllung
- Undichtheit

Ebenso ist es schwierig, wenn mehrere Geräte mit unterschiedlichen Kapillaren ausgestattet werden.

- Viel Testinfrastruktur nötig bei hohem Betreuungsaufwand
- Unterschiede in den Messungen aufgrund anderer Toleranzen im Fertigungsprozess (weil oft im frühen Entwicklungsstadium)
 - Kältekreis Komponenten
 - Gehäuseisolation
 - Einzelteile
 - Regelung
- Unterschiede in den Messungen aufgrund Toleranzen der verwendeten Sensoren

Eine gängige Hilfe im Entwicklungsprozess ist die Integration von speziellen Drosselsektionen in den Funktionsmustern. Solche Sektionen weisen in der Flüssigkeitsleitung beispielsweise einen Verteiler auf, an welchem verschiedene Kapillaren in den einzelnen Zweigen angebracht sind. In jedem Zweig befindet sich ein Ventil. Über die Schaltstellungen der Ventile können unterschiedliche Kapillaren aktiviert oder parallel geschaltet werden. Dieser Ansatz erhöht die Systemfüllmenge signifikant und es kann nicht im gleichen Zuge eine Füllmengenbestimmung mit dem Funktionsmuster durchgeführt werden. Ebenso können interne Wärmetauscher – die thermische

Kopplung der Kapillare mit einer anderen Leitung – nur bedingt abgebildet werden. Die Einschränkungen diesbezüglich resultieren aus dem Umstand, dass jeder Kapillarzweig mit dieser Leitung gekoppelt werden müsste. Abgesehen von der möglichen Beeinflussung des aktiven Zweigs durch die inaktiven Zweige, ergibt sich auch ein geometrisches Problem bei einer solchen Umsetzung.

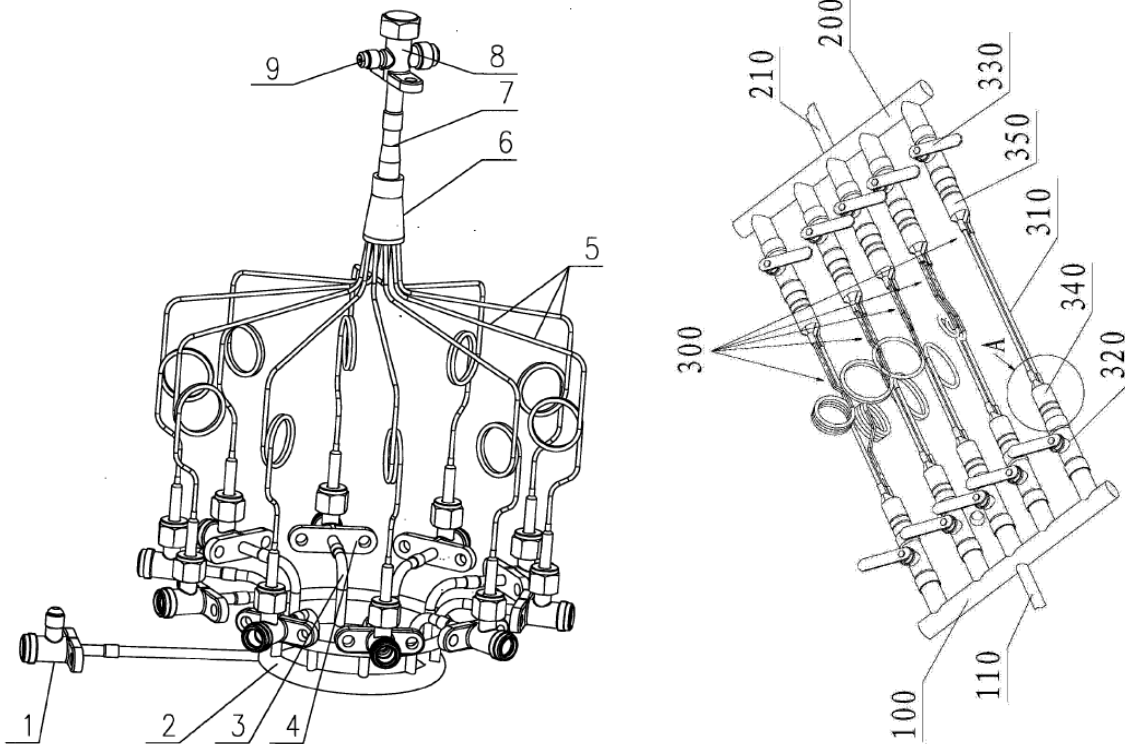


Bild 1: Beispiele von Drosselsektionen mit Verteiler (links: Xiande [1], rechts: An *et al.* [2])

Aus der Literatur ist auch die Methode mit segmentweiser Verlängerung der Kapillarlänge bekannt. Dabei werden Kapillarsegmente mittels T-Stücken und Ventilen aneinandergereiht. Jedes T-Stück führt zu Druckabfällen, die nicht der Realität eines Kapillarrohrs entsprechen: Das Kältemittel expandiert in eine Kavität hinein, welche sich dann wieder in das nächste Kapillarsegment verjüngt. Spätestens nach Erreichen der Schallgeschwindigkeit finden so signifikante Druckabfälle statt und die segmentierte Kapillare wird wesentlich restriktiver sein als eine Einrohr-Kapillare mit derselben Gesamtlänge. Mit diesem Ansatz ist es dafür möglich, einen internen Wärmetauscher auszubilden.

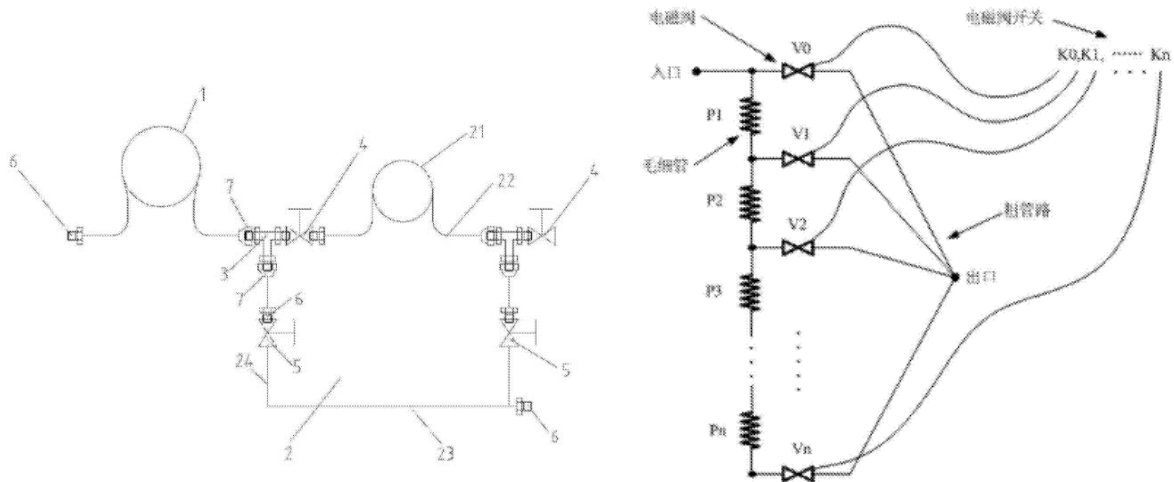


Bild 2: Beispiele von segmentweisen Verlängerungen der Kapillare (links: Qiao *et al.* [3], rechts: Zhang [4])

In diesem Beitrag wird eine in-situ-Auslegungsmethode für Kapillaren vorgestellt, welche von ThermodynamX entwickelt wurde und die oben genannten Probleme adressiert. Ebenso wird die Anwendung des entwickelten Werkzeugs anhand zwei konkreter Fälle demonstriert.

2 Das Kapillartool

Die in-situ-Auslegungsmethode für Kapillaren basiert auf der Integration eines besonderen Werkzeugs zwischen Filtertrockner (Flüssigleitung) und Verdampfereintritt. Dieses Werkzeug – im folgenden "Kapillartool" genannt – ermöglicht es, mehrere Kapillardurchflüsse in einem System anzuwählen, dies bei minimalster Füllmengenbeeinflussung und der Möglichkeit, einen internen Wärmetauscher zu integrieren.

Das Kapillartool besteht aus verschiedenen Teilstücken. Es bildet sich aus einem Einlass- und Auslasssegment (E und A), zwischen denen sich eine mechanische Konstruktion, bestehend aus Fixteil und Schieber, befindet. Am Fixteil kann eine gewisse Anzahl von Kapillarsegmenten (1..x) angeschlossen werden. Schieber und Fixteil bilden im Inneren Strömungskanäle aus, welche die Kapillarsegmente miteinander in Reihe verschalten. Ein wählbarer Relativversatz von Fixteil zu Schieber entscheidet über die Anzahl der Kapillarsegmente, die zwischen E und A in Reihe geschaltet werden.

Mit dem Kapillartool lassen sich damit x Restriktionslevel (Stufen) der Drosselsektion einstellen. Die Charakteristik der x Stufen wiederum ist durch die Auslegung (Längen und Innendurchmesser) der Einzelsegmente bestimmt. Das Kapillartool ist damit für den individuellen Zweck konfigurierbar.

Da die internen Kanäle innerhalb von Fixteil und Schieber in einem Innendurchmesser gefertigt sind, der in der Regel +/-0.05 mm dem Durchmesser der angeschlossenen Kapillarsegmente entspricht, werden Zwischenexpansionen verhindert und der Unterschied von Kapillartool zur finalen Kapillare auf die Systemfüllmenge ist somit minimal.

Tabelle 1: Aufbau des Kapillartools

Stufe									Restriktion
1	E	x	x-1	...	3	2	1	A	hoch
2	E	x-1	...	3	2	1	A		.
3	E	...	3	2	1	A			.
...	E	3	2	1	A				.
x-1	E	2	1	A					.
x	E	1	A						tief

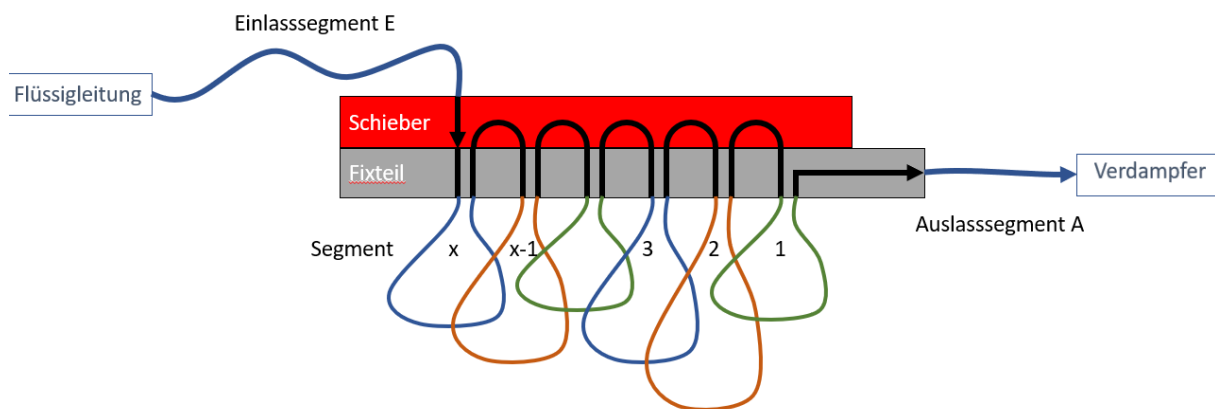


Bild 3: Veranschaulichung des Kapillartools auf Stufe 1

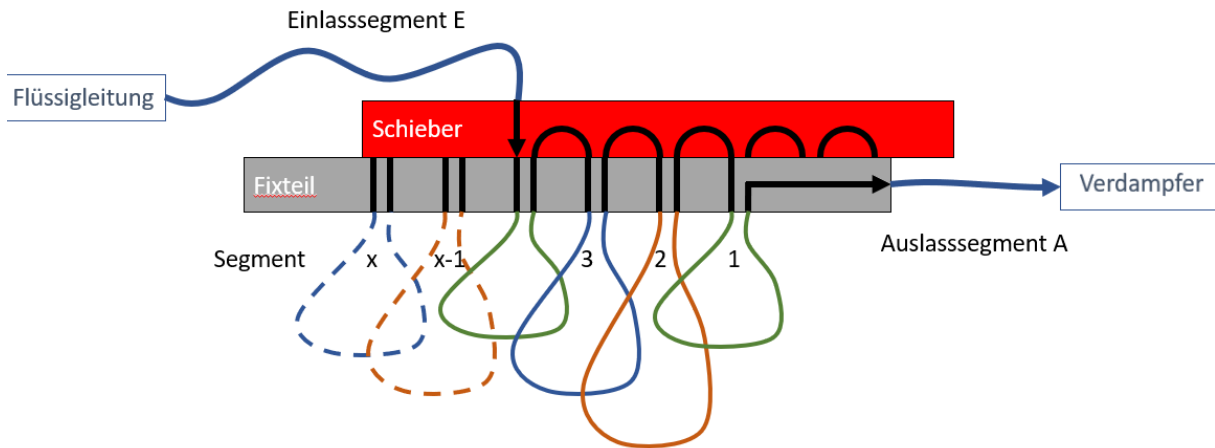


Bild 4: Veranschaulichung des Kapillartools auf Stufe 3

Unter der Annahme einer exemplarischen Bestückung des Kapillartools mit den Segmenten gemäss **Tabelle 2**, wird ersichtlich, wie man den Kapillardurchfluss in-situ von 3.3 – 7.8 sl/min über 7 Stufen variieren kann.

Tabelle 2: Exemplarische Segmentkonfiguration für einen breiten Variationsbereich

Segment	E	7	6	5	4	3	2	1	A
ID [mm]	0.8	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.7
Länge [m]	2.0	2.0	1.4	1.1	0.8	0.5	0.3	0.1	0.3

In diesem Beispiel würde das Tool unterschiedliche Segmentlängen am Fixteil aufweisen und einen sehr breiten Durchflussbereich abdecken können (**Bild 5**). Dabei entspräche der Durchfluss von 5.2 sl/min auf der Stufe 4 dem vom Entwickler kalkulierten oder anvisierten Zieldurchfluss, welcher aber noch von -37 bis +45% verändert werden kann.

Das Segment E wird bewusst mit einem etwas grösseren Innendurchmesser ausgeführt, um eine praktikable Segmentlänge für die Realisation eines internen Wärmetauschers zu erreichen. Mit zunehmender Näherung zum Verdampfer dürfen sich die Segmentinnendurchmesser reduzieren. Sie sollten sich aber idealerweise nicht mehr erhöhen, um das Risiko von Zwischenexpansionen zu minimieren.

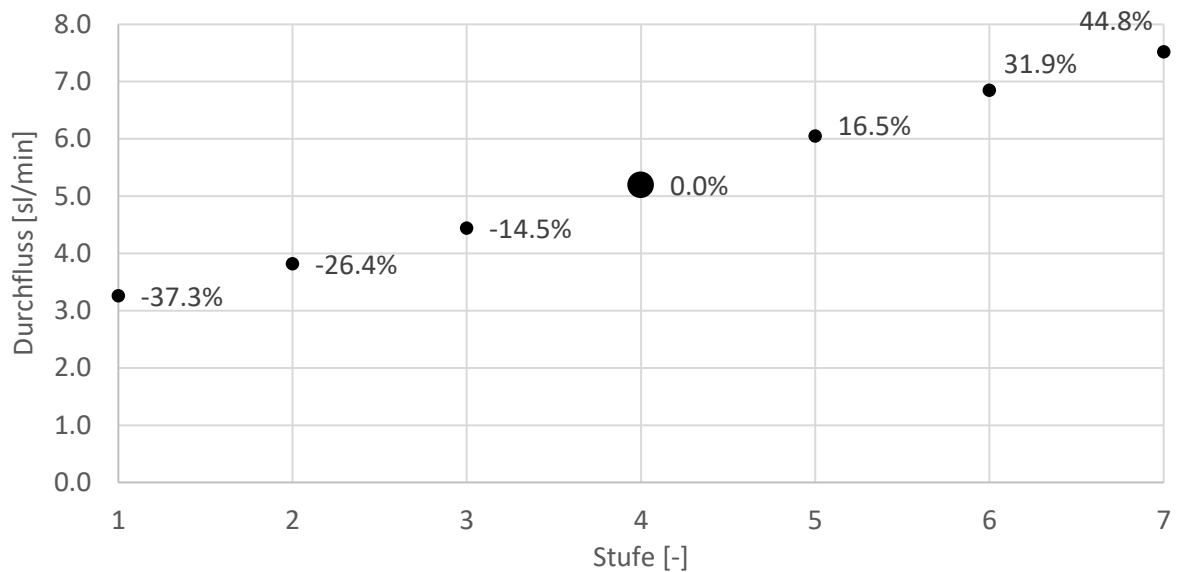


Bild 5: Variationsbereich des Kapillartools nach **Tabelle 2**

Die Konfiguration nach **Tabelle 2** ist in einem sehr frühen Stadium im Entwicklungsprozess denkbar, um den bis dahin praktisch unbekanntem Soll-Kapillardurchfluss einzugrenzen. Trotz des breiten Durchflussbereichs ist die Füllmengendifferenz zwischen Tool und der finalen Kapillare sehr klein. Nehmen wir an, dass der Durchfluss auf Stufe 4 (5.2 sl/min) mit einer Kapillare im Serienprodukt umgesetzt wird. Dann würde diese Kapillare bei einem Innendurchmesser von 0.7 mm eine Länge von rund 3.1 m aufweisen.

Das Innenvolumen des Kapillartools in obiger Konfiguration beträgt ca. 3.9 cm³, dasjenige der finalen Kapillare lediglich 1.2 cm³. Die Füllmengenberechnung in der Kapillare inkl. internen Wärmetauscher ist komplex. Doch bereits mit einer vereinfachten Rechnung bekommt man ein Gefühl für den immer noch geringen Füllmengen-einfluss unter der Verwendung des Kapillartools. Den signifikantesten Einfluss hat die Einlassstrecke der Kapillare, wo das Kältemittel noch in flüssigem Zustand vorliegt. Unter der Annahme, dass 1/3 des Gesamtvolumens mit Flüssigkeit (Dichte 0.5 g/cm³) gefüllt ist, ergibt sich ein Unterschied von rund 0.4 g.

Die Konfiguration des Tools erfolgt mit Hilfe eines hauseigenen Berechnungsprogramms, mit welchem alle Segmente theoretisch festgelegt werden. Am angefertigten Kapillartool wird dann in einem Kapillarprüfstand für jede Stufe der Durchfluss unter den vom Kunden geforderten Bedingungen gemessen und gegebenenfalls die Segmente so nachjustiert, dass das Tool der Soll-Charakteristik entspricht. Aktuell prognostiziert die Berechnungshilfe von ThermodynamX den Durchfluss pro Stufe mit Abweichungen von +/- 5% zur Realität. Die Genauigkeit der Software kann mittels Rückführung der Messdaten verbessert werden.

3 Anwendung des Kapillartools in der Praxis

3.1 Einfluss der Lieferanten-seitigen Durchflusstoleranz von Kapillaren auf das System

Haushaltskühlschränke müssen höchsten Effizienz- und Marktanforderungen gerecht werden. Regulatorien fordern die schrittweise Effizienzsteigerung, während der Kunde nur bedingt mehr Geld für effizientere Haushaltsgeräte ausgeben möchte. In diesem Spannungsfeld zwischen qualitäts- und herstellkostenbewusster Entwicklung&Produktion werden die kumulierten Toleranzen zur Herausforderung. Um nur einige zu nennen, wird die Effizienz von

- geometrischen Toleranzen der Geräteeinzelteile und -baugruppen (z.B. Spaltmasse),
- verschiedenen Komponententoleranzen (bspw. Kompressoreffizienzen),
- relative Füllmengentoleranzen (hervorgerufen durch die Genauigkeit der Befüllanlage und Volumentoleranzen der Kältekreis-komponenten)

beeinflusst.

Eine MonteCarlo-Simulation zeigte auf, dass unter den verschiedenen Einflussfaktoren die Kapillare signifikante Wirkung auf den Energieverbrauch des Kühlschranks hat. Im zugrundeliegenden Kühlschranksmodell wurde für die Berechnung die Variation der Kapillare via variabler Überhitzung ausgedrückt (**Bild 6**: Bless und Vetsch [5]).

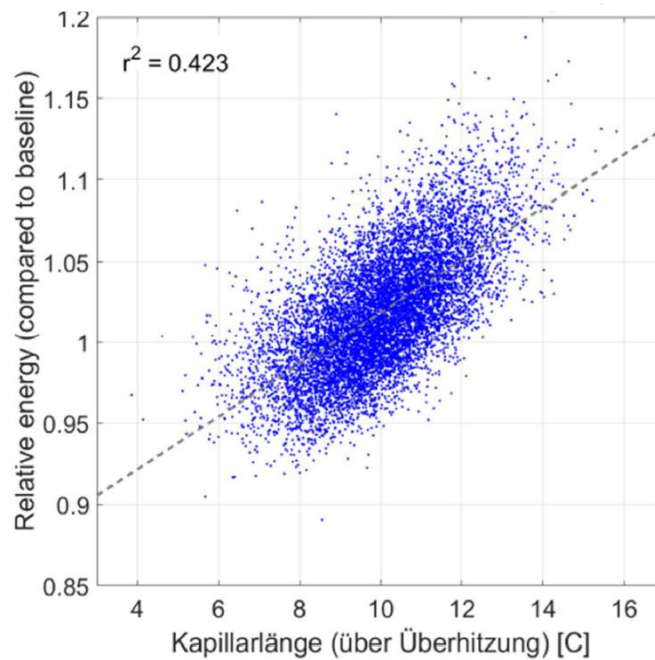


Bild 6: Einfluss der Kapillare auf die Energieaufnahme anhand einer MonteCarlo-Simulation

Die Kapillare wird standardmässig vom Lieferanten mit einer Durchflusstoleranz von +/-5% geliefert. Mit den bisherigen, einleitend erwähnten Methoden war es nicht möglich, den alleinigen Einfluss dieses Toleranzfeldes auf die Effizienz des Kühlschranks zu messen. Es war weder möglich, eine belastbare Datengrundlage zu schaffen, mit welcher man die Mehrkosten einer engeren Durchflusstolerierung hätte begründen können, noch war man sich sicher, ob die aktuelle Toleranz für eine hohe Fertigungssicherheit ausreichend ist.

Es wurde daher zusammen mit der V-ZUG Kühltechnik AG ein Kapillartool konfiguriert, welches den Nenndurchfluss und einen Bereich von ca. +/-5% dazu abbildet. Dieses wurde in einen einkreisigen (ohne Kapillarschaltventil) Kühlschrank mit Kühlfach (KF) und innenliegendem Gefrierfach (GF) eingebunden. Einfachheitshalber wurde das Gerät mit einem Fixdrehzahlkompressor ausgestattet. Das Kältemittel wird über die Kapillare in den GF-Verdampfer eingespritzt und strömt anschliessend in den seriell nachfolgenden KF-Verdampfer. Die KF-Temperatur wird geregelt und die GF-Temperatur ergibt sich passiv.

In Bezug auf das Kapillartool war zu berücksichtigen, dass der Filtertrockner, an welchem das Einlassegment startet, sich im Sockel des Kühlschranks befindet. Das Segment E wird daraufhin im Gegenstrom der Saugleitung entlang verlegt und damit ein interner Wärmetauscher realisiert. Die Konstruktion aus Schieber und Fixteil mit den 5 Kapillarsegmenten ist dann im oberen Bereich des Kühlschranks, ca. 1.5 m über Boden angebracht. Damit genügend physikalische Länge vorhanden war, musste E mit einem Innendurchmesser von 0.7 mm ausgeführt werden. Die Auslassstrecke A führt dann zur Einspritzstelle des untersuchten Kühlschranks.

Die Konfiguration nach **Tabelle 3** ermöglicht es, den Durchfluss mit Zwischenstufen von -5.2 bis +6.5% Änderung zu Nenndurchfluss (Stufe 3, 3.68 sl/min) zu variieren.

Tabelle 3: Konfiguration des Kapillartools für den Anwendungsfall "Fertigungstoleranz"

Segment	E	5	4	3	2	1	A
ID [mm]	0.7	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.6
Länge [m]	2.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.8
				3.68 sl/min			

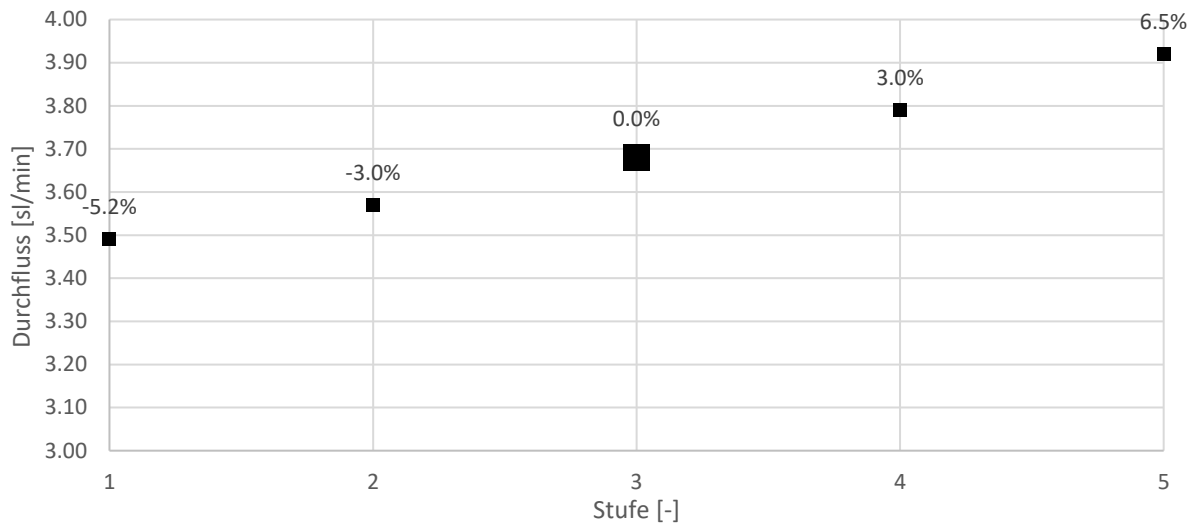


Bild 7: Messung der Konfiguration nach **Tabelle 3**

Aus verschiedenen Gründen wird das Endresultat der Untersuchung nicht abschliessend präsentiert. Zum einen befinden sich Messungs- und Berechnungspraktiken für die Ermittlung des Normenergieverbrauchs von Haushaltskühlschränken in einer Umstellungsphase, wobei für diesen ersten Test noch gemäss "alter Norm" gearbeitet wurde. Und zum anderen sind Details der Resultate und Schlussfolgerungen ein geschütztes Knowhow der V-ZUG Kühltechnik AG.

Die Daten eines Kühlzyklus zeigen aber einen messbaren Einfluss der Durchflusstoleranz der Kapillare auf die mittlere Leistungsaufnahme des untersuchten Geräts (**Bild 8**). Mit sinkendem Kapillarendurchfluss sinkt erwartungsgemäss auch die Temperatur im Gefrierfach. Die Kapillare senkt das anliegende Temperaturniveau am Verdampfer und es entfällt damit mehr Kälteleistung auf den Gefrierfachverdampfer. Der Regler, welcher die Kühlfachtemperatur überwacht, muss den Kompressor daher länger betreiben, damit derselbe Energieentzug aus dem Kühlfach stattfinden kann.

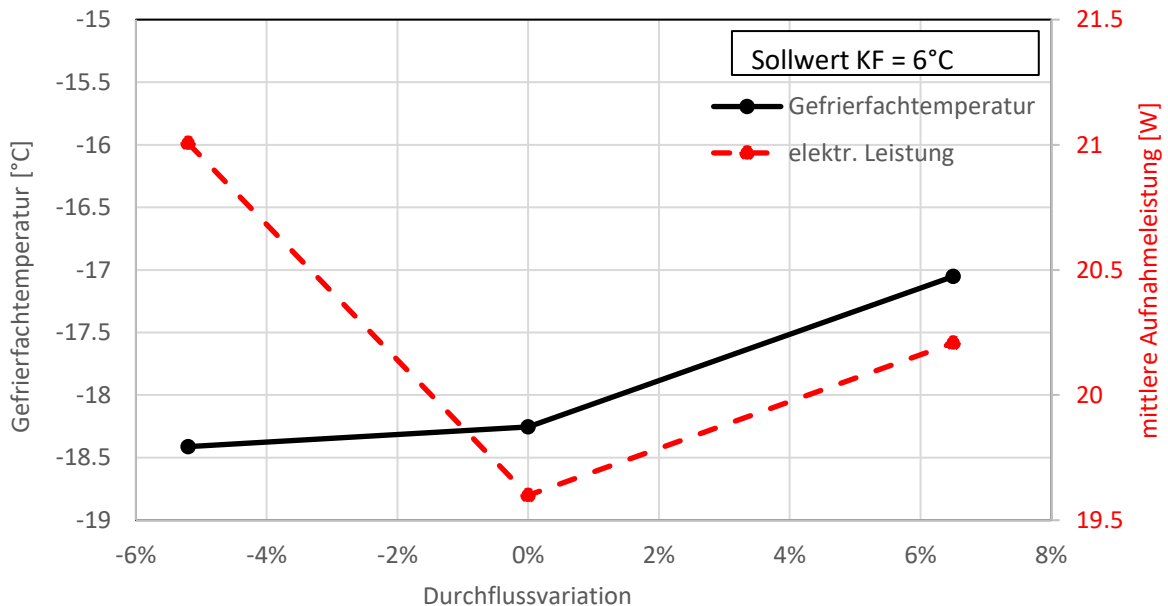


Bild 8: Einfluss der Durchflusstoleranz auf die mittlere Aufnahmeleistung eines Kühlzyklus (Messwerte bei -3% und +3% noch ausstehend)

Dass die elektrische Aufnahmeleistung bei 0% ein Minimum zeigt, bedarf einer näheren Betrachtung anhand (**Bild 9** und **Bild 10**). Bei einem Fixdrehzahlkompressor ist das Verhalten der elektrischen Leistungsaufnahme erwartungsgemäss höher bei grösserem Kapillardurchfluss. Ebenfalls ist deutlich ersichtlich, wie der Kompressor bei kleinem Durchfluss eine längere Laufzeit aufweist, um den Sollwert im Kühlfach aufrecht zu erhalten. Weit weniger deutlich ist die kürzere Laufzeit bei der höheren Durchflusseinstellung.

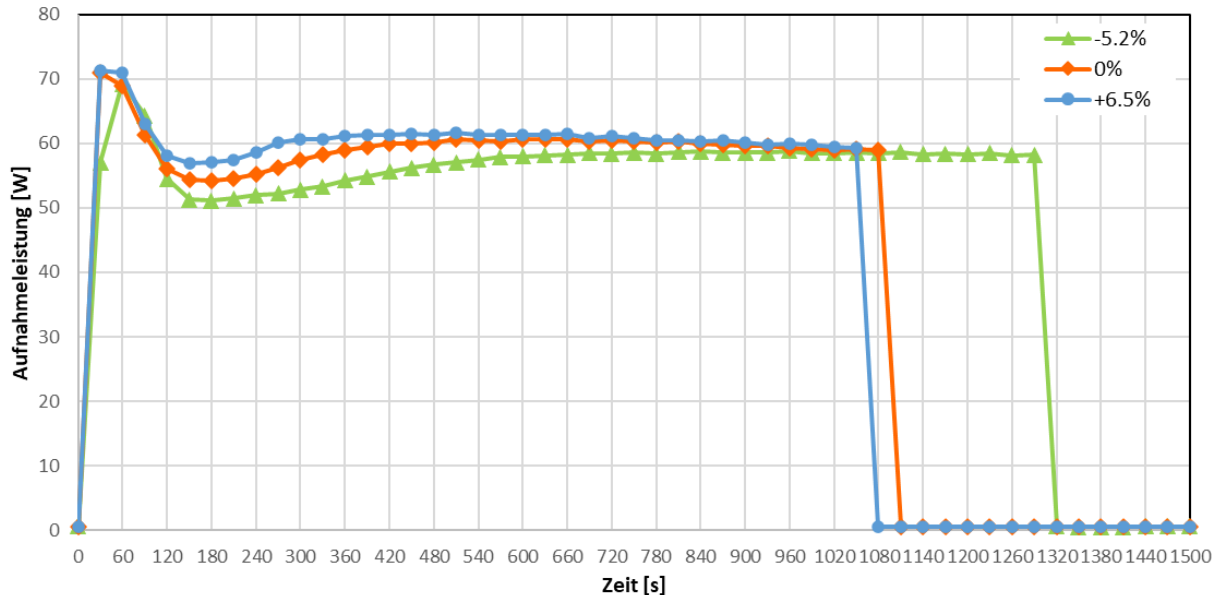


Bild 9: Verlauf der Leistungsaufnahme bei verschiedenen Durchflüssen bei Sollwert Kühlfach 6°C

Im nachfolgenden **Bild 10** sind die Eintrittstemperaturen am Kühlfach- und Gefrierfachverdampfer, korrespondierend zu **Bild 9**, ersichtlich. Bei kleinerem Durchfluss liegt die Eintrittstemperatur am Gefrierfachverdampfer (GF_ein) am tiefsten, aber es dauert am längsten, bis auch diejenige des Kühlfachverdampfers (KF_ein) absinkt und das Kühlfach mit genügend Temperaturdifferenz kühlen kann. Auf der höchsten Durchflusstufe sinkt KF_ein im Vergleich zur Basisstufe nicht signifikant früher ab, weshalb sich die Laufzeit nur geringfügig unterscheidet. Der Grund für dieses Verhalten liegt vermutlich in einer schwindenden Unterkühlung und muss im Rahmen weiterer Messungen untersucht werden. Doch es kann dennoch bereits festgehalten werden, dass dieser Kältekreis mit einem Fixdrehzahlkompressor sensibel auf Toleranzschwankungen des Kapillardurchflusses reagiert mit messbaren Auswirkungen hinsichtlich Energieeffizienz. Inwiefern ein drehzahlvariabler Kompressor diese Effekte beeinflusst, bleibt Gegenstand künftiger Untersuchungen.

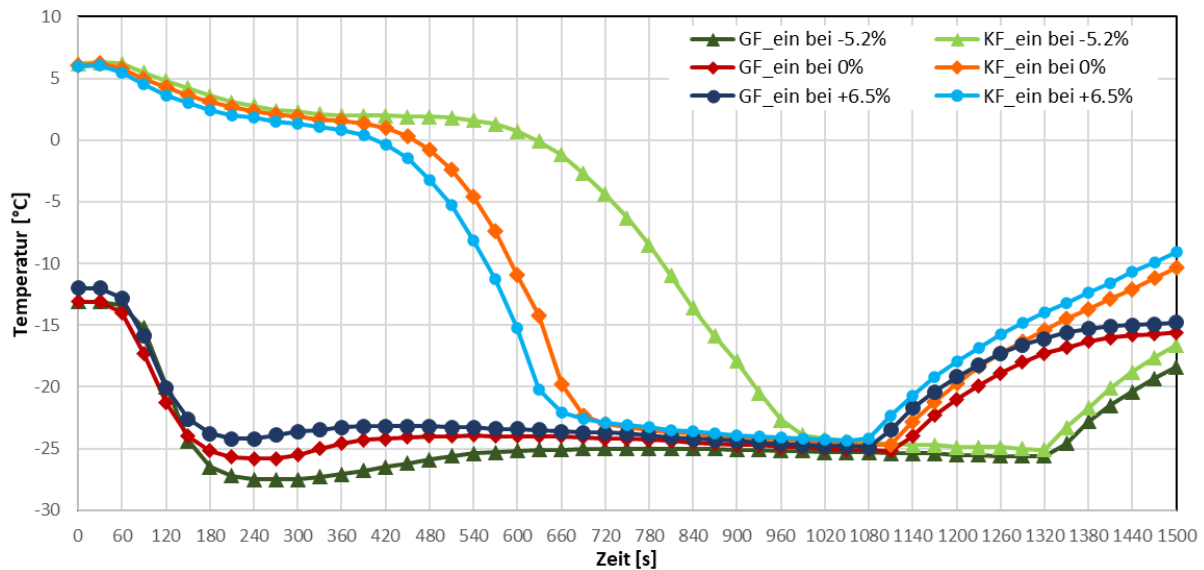


Bild 10: Temperaturverläufe von Gefrierfach- und Kühlfachverdampfeintritt bei Sollwert Kühlfach 6°C und verschiedenen Durchflusseinstellungen

3.2 Einhaltung des Arbeitskennfelds eines Kompressors

Im Rahmen einer Neuentwicklung eines Gerätes mit Kühlfunktion wurde die Kühleinheit als teil-redundantes Doppelaggregat umgesetzt. Die beiden Aggregate sind baugleich mit einer Drosselkapillare ausgestattet. Als Kältemittel wird R600a eingesetzt. Die Kühleinheit soll ein in sich geschlossenes Raumvolumen temperieren. Die entzogene Wärmeenergie wird über die Verflüssiger an die Umgebung abgegeben. Für eine Regelung der Innenraumtemperatur ohne Temperaturschwankungen sorgt eine modulierbare elektrische Heizung. Der Einsatzbereich für die Kühleinheit umfasst zwei markante Anforderungen.

- a) Bei 25°C Raumtemperatur soll der Innenraum auf 4°C gekühlt werden können. Dazu müssen beide Aggregate betrieben werden.
- b) Bei 40°C Raumtemperatur soll der Innenraum auf 37°C temperiert sein und die Kälteanlage auf möglichst hoher Verdampfungstemperatur arbeiten. Es wird nur eines der zwei Aggregate betrieben.

Die beiden drehzahlvariablen Kompressoren sollen mit der Maximaldrehzahl die Bedingung a) und ein Kompressor mit der Minimaldrehzahl die Bedingung b) erfüllen. Trotz der passiv arbeitenden Kapillare sollen die Kompressoren innerhalb ihrer Spezifikation arbeiten.

Das Arbeitskennfeld ist Kompressor-seitig vor allem bei der Bedingung b) begrenzt. Die Kondensations- und Verdampfungstemperaturen dürfen auf der Minimaldrehzahl nicht über 60°C, respektive 10°C liegen. Abgesehen von Verflüssiger, Verflüssigerlüfter und Füllmenge bestimmt die Kapillare die Verdampfungstemperatur durch ihre Restriktivität und auch die Kondensationstemperatur aufgrund des Massenstroms, der durch die Kapillarlänge ermöglicht wird. Eine restriktive Kapillare würde die Verdampfungs- und Kondensationstemperatur tief halten, jedoch ebenso die Leistungsfähigkeit des Systems in allen Arbeitspunkten beschneiden.

Entscheidend für die Bestimmung der Kapillare ist daher die Erfüllung von Bedingung a), wenn die Kompressoren auf der Maximaldrehzahl betrieben werden. Die Kapillare muss genügend "gross" dimensioniert werden, dass die Kälteleistung zur Erreichung des Sollwerts vorhanden ist. Jedoch muss die Verdampfungstemperatur auch unter diesem Aspekt $\leq -5^\circ\text{C}$ gehalten werden.

Bei der Inbetriebnahme des Doppelaggregats wurde zwei Kapillartools verwendet. Diese erlaubten die Variation der Kapillare an beiden Aggregaten in 10 Durchflussstufen über einen Bereich von rund 4 – 6 sl/min. Es ermöglichte ebenfalls die zeitgleiche Erstellung eines internen Wärmetauschers mit dem Segment E. Dank der

Verwendung der Kapillartools waren für die Kapillarlängen- und Füllmengenbestimmung keine Änderungen an den Kältekreisen notwendig und verschiedenen Füllmengen/Kapillaren-Kombinationen konnten in kurzer Zeit getestet werden.

Die Stufe 7 mit 5.2 sl/min erfüllt die Anforderung an die Leistungsfähigkeit des Systems. Sie erreicht bei 25°C Umgebungstemperatur die 4°C im Innenraum mit Leistungsreserve. Dies bei einer Verdampfungstemperatur von -7°C.

Bei 40°C Umgebungstemperatur und einer Innenraumtemperierung auf 37°C arbeitet der Kältekreis bei einer Verdampfungstemperatur von 7°C und einer Kondensationstemperatur von 59°C. Beide Anforderungen werden mit etwas Marge erfüllt, so dass gewisse Durchfluss- und Füllmengen toleranzen in der Serienproduktion zu verkräften sind. Innerhalb eines Tages konnten im Schnitt fünf verschiedene Durchflussstufen getestet werden. Mit einem herkömmlichen Ansatz durch Auswechseln der Kapillare hätte schätzungsweise eine Variante pro Tag getestet werden können.

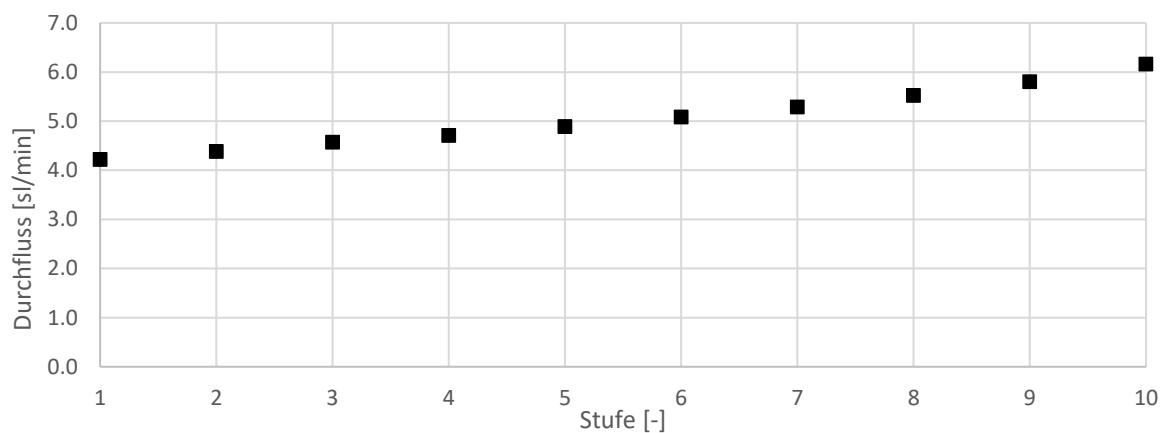


Bild 11: Messung des konfigurierten Kapillartools für den Anwendungsfall "Arbeitskennfeld"

4 Zusammenfassung

Das Kapillartool eröffnet neue Möglichkeiten für einen effizienten Entwicklungsprozess für Kältekreise mit breitem Betriebsbereich und einer Kapillare als Drosselorgan. Ebenso kann es für verschiedene experimentelle Untersuchungen und Analysen eingesetzt werden. Der Aufbau des Tools ist kompakt. Es lässt sich auch in kleinen Bauräumen einbinden und beeinflusst die Füllmenge des Kältekreises nur in sehr geringem Masse (ca. 0.5 g). Die mit dem Kapillartool ermittelte Durchflussspezifikation kann eins-zu-eins in die Fertigung eines Kapillarrohrs übertragen werden.

Das Kapillartool besteht aus einem Fixteil und einem Schieber, in welchen ein Ein- und Auslassegment, sowie x Stufensegmente von Kapillaren eingebracht sind. Je nach Relativversatz zwischen Fixteil und Schieber entsteht eine sequenzielle Verschaltung von Einlassegment, Stufensegmenten und Auslassegment. Pro Schaltstellung ergibt sich damit ein Durchflusswert. Die Konfiguration des Kapillartools erfolgt durch die Wahl der Segmentlängen und -innendurchmesser und der Anzahl von Stufensegmenten.

Der Einsatz des Kapillartools bei einem Kühlschrank zeigte die Auswirkung der Herstellertoleranz für Kapillaren auf das Betriebsverhalten des Geräts. Ausgehend von der Baseline (0%) mit Regelung auf einen KF-Sollwert von 6°C, sinkt bei einem Durchfluss von -5.2% die GF-Temperatur um 0.1 K und die Aufnahmeleistung steigt um 7%. Bei einem Durchfluss von +6.5% steigen GF-Temperatur um 1.2 K und die Aufnahmeleistung um 3% an.

Das Tool erwies sich in einem weiteren Projekt als sehr hilfreich, um zwei gegensätzliche Anforderungen an einen Kältekreis mit Kapillare zu erfüllen. Die "Maximale Kälteleistung" Anforderung erfordert eine wenig restriktive Kapillare, während die vom Kompressor zulässigen maximalen Kondensations- und Verdampfungstemperaturen

eine gewisse Begrenzung des Durchflusses erfordern. Ohne Kältekreisumbauten am Doppelaggregat war es möglich, die Kapillaren in 10 Stufen zu variieren und damit verschiedenen Füllmengen/Kapillaren-Verhältnisse zu testen. Die Testzeit für die Kapillarendefinition war mit diesem Ansatz gegenüber einem iterativen Ansatz (mit Umbauten) um schätzungsweise Faktor 5 kürzer.

5 Nomenklatur

Abkürzungen / Einheiten

sl/min	Durchfluss mit Stickstoff in Standardliter* pro Minute durch die Kapillare bei Eintrittsdruck 9.81 bar abs und freiblasender Austritt. *Referenztemperatur 20°C
KF	Kühlfach
GF	Gefrierfach

6 Literatur

- [1] Xiande, L. (2010) Apparatus of air conditioner for matching capillary tubes (CN201666699U). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/043267658/publication/CN201666699U?q=pn%3DCN201666699U>
- [2] An, J., Liang, G., Shi, Z., Wang, Q., Wie, S., Zhou, J. (2014) Capillary matching device (CN203785344U). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/051321522/publication/CN203785344U?q=CN203785344U>
- [3] Qiao, G., Wang, R., Wang, Y., Zhang, Z. (2019) Tool for determining target capillary tube (CN110160288A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/067640161/publication/CN110160288A?q=CN110160288A>
- [4] Zhang, W. (2017) Dynamic length regulation device for refrigeration capillary tubes (CN107388645A). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/060354154/publication/CN107388645A?q=CN107388645A>
- [5] Bless, F., Vetsch, B. (2017) MonteCarlo-Simulation – Wirkung der statistischen Streuung von Einzelparametern auf die Gesamteffizienz eines Kühlschranks. Interner Bericht für die V-ZUG Kühltechnik AG.