

# Lüftungskanäle als Funkstrecke

Max Huber<sup>1</sup>, Sebastian Rau<sup>2</sup>, Rita Streblov<sup>1</sup>, Jörg Wollert<sup>2</sup>, Dirk Müller<sup>1</sup>

- 1) Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik  
RWTH Aachen  
Mathieustraße 10  
52074 Aachen
- 2) Lehr- und Forschungsgebiet Automatisierungstechnik  
FH Bielefeld,  
Schulstraße 10  
33330 Gütersloh

mhuber@eonerc.rwth-aachen.de  
sebastian.rau@fh-bielefeld.de  
rstreblov@eonerc.rwth-aachen.de  
joerg.wollert@fh-bielefeld.de  
dmueller@eonerc.rwth-aachen.de

## 1 Kurzfassung

Die Nutzung von Lüftungskanälen stellt eine Möglichkeit dar, Funksignale innerhalb von Gebäuden zuverlässig zu übertragen. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen auf, dass eine stabile Signalqualität erzielt werden kann. Reflexionen und konstruktive Überlagerung der Signale führen bei gleicher Sendeleistung und gleicher Entfernung im Kanal zu höheren empfangenen Signalstärken als im Freifeld. Einbauten im Kanal bewirken lediglich moderate Abschwächungen der Signale. Das Übertragungsverhalten variiert bei verschiedenen Frequenzen, wobei sich die Verwendung des 2,4 GHz Bandes auf Grund des Hohlleitereffekts vorteilhaft gegenüber der Verwendung des 868 MHz-Bandes darstellt.

## 2 Einleitung

Die Effizienz von raumluftechnischen Anlagen ist im hohen Maße davon abhängig, dass die zur Verfügung gestellte Luftmenge dem tatsächlichen Bedarf entspricht und sich die Konditionierung der Zuluft an die Gegebenheiten im Gebäude anpasst. In der DIN EN 15232 ist festgelegt, dass die höchste Energieeffizienzklasse in Gebäuden nur mit Hilfe einer bedarfsgerechten Regelung erreicht werden kann (1).

Um diese bedarfsorientierte Energie- und Luftversorgung zu gewährleisten, ist ein Kommunikationssystem zwischen Verbraucher- und Versorgungseinheiten unumgänglich. Der Aufwand, ein solches Netzwerk kabelbasiert aufzubauen, ist vor allem in Bestandsgebäuden sehr hoch. Der Einsatz von Funktechnik reduziert diesen Aufwand erheblich.

Auf der anderen Seite bereitet drahtlose Datenübertragung vor allem dort Probleme, wo Brandschutzmauern, getrennte Baukörper o.ä. das Funksignal stören (2, 3). So kann eine einzelne 300 mm Stahlbeton-Decke (nach Bauvorschrift, wie im Hochbau üblich) ein Funksignal um bis zu 20 dB dämpfen (3). Zudem ist die Zuverlässigkeit der Übertragung von äußeren Störgrößen, wie weiteren Funksystemen, abhängig und die Auslegung der Sender- und Empfängerkonfiguration muss für eine verlustfreie Kommunikation individuell geplant werden. (4)

Ein Ansatz, der den Einsatz von Funktechnik in Gebäuden effizienter und einfacher macht, liegt darin, die Funksignale innerhalb bestehender Lüftungskanäle zu übertragen. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass sämtliche baulichen Hindernisse auf vorhandenen Wegen überwunden werden können. Jedoch sind Luftkanalsysteme oftmals sehr verzweigt und mit verschiedenen Querschnitten und Materialien aufgebaut. Zudem befinden sich in den Kanälen Einbauten zur Luftführung und -konditionierung, die potentielle Hindernisse für elektromagnetische Wellen darstellen. Somit ist eine Untersuchung des

Übertragungsverhaltens von Funksignalen in realen Lüftungskanälen mit realen Komponenten ein erster Schritt zur Umsetzung dieses Ansatzes.

Ziel der vorgestellten Messreihen ist es, das Übertragungsverhalten im Lüftungskanal im Vergleich zum entsprechenden Verhalten im Freifeld zu untersuchen. Des Weiteren werden die Auswirkungen verschiedener Einbauten im Kanal auf die Funkübertragung vermessen und bewertet.

### 3 Versuchsaufbau

Um das Verfahren standardisiert testen zu können, wird ein Prüfstand verwendet, der es erlaubt, verschiedene Kanalstrecken aufzubauen und mit unterschiedlichen Funkmodulen zu bestücken.

#### 3.1 Eingesetzte Funkmodule

Im technisch nutzbaren Frequenzspektrum können das 2,4 GHz-Band sowie das 868 MHz-Band „lizenzfrei genutzt werden“ (4). In der Gebäudetechnik ist derzeit v.a. das 868 MHz-Band verbreitet (z.B. EnOcean-Anwendungen) (5). Die Wellenlänge  $\lambda$  der elektromagnetischen Funksignale lässt sich wie folgt aus Frequenz  $f$  und Lichtgeschwindigkeit  $c$  berechnen (4).

$$\lambda = c/f$$

Die Wellenlänge im 868 MHz-Bereich liegt somit bei ca. 34,6 cm, im 2,4 GHz-Bereich bei ca. 12,5 cm.

Als Funkmodule werden im Versuchsaufbau für das 868 MHz-Frequenzband CC430 Wireless Development Tools von Texas Instruments verwendet (6). Für den 2,4 GHz-Bereich kommt das CC2590 Development Kit (dargestellt in Abbildung 3-1) von Texas Instruments (7) zum Einsatz.

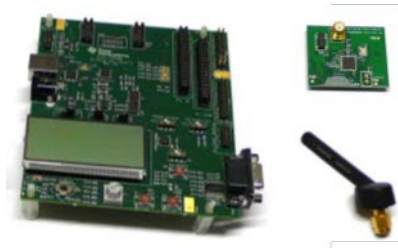


Abbildung 3-1 Funkmodul CC2590 Development Kit für 2,4 GHz (1)

Als Programm für die Versuchsdurchführung, Dokumentation und Modulsteuerung wird SmartRF Studio 7 von Texas Instruments verwendet (8). In den Versuchsdurchläufen werden jeweils 400 Pakete mit je 15 Byte Nutzdaten gesendet. Gemessen werden die Signalstärke am Empfänger für jedes Paket sowie die Vollständigkeit der Pakete. Daraus errechnen sich die durchschnittliche Signalstärke sowie eine entsprechende Paketfehlerrate.

#### 3.2 Teststand

Für die Untersuchung und Bewertung der Funksignalübertragung in Lüftungskanälen wird ein Teststand in der Versuchshalle des EBC in Aachen verwendet. Der Teststand besteht aus einem 43 m langen Lüftungskanal mit 300 mm Durchmesser. Nach einer Länge von 15 m besteht die Möglichkeit, ein Teilstück des Testkanals durch alternative Einbauten zu ersetzen. Abbildung 3-2 zeigt den schematischen Aufbau des verwendeten Teststands.

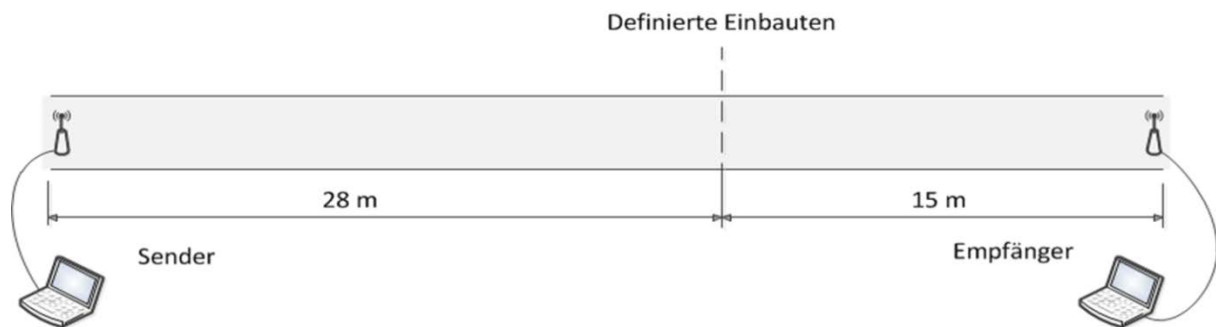


Abbildung 3-2 Schematischer Aufbau des Funkversuchs

Beide Enden des Testkanals sind frei zugänglich, sodass dort jeweils Sender oder Empfänger angebracht werden können. Während der Funkversuche sind die offenen Enden durch ein Gitternetz von der Umgebung abgeschirmt, um eine Signalübertragung außerhalb des Kanals zu unterbinden. Durch den gewählten Testaufbau ist es möglich, das Übertragungsverhalten anhand unterschiedlicher Einbauten mit verschiedenen Varianten von Sendern und Empfängern zu testen.

### 3.3 Kanaleinbauten

Die untersuchten Einbauten lassen sich grundsätzlich in drei Bereiche einteilen.

- Querschnittsverjüngungen: Um den Einfluss des Rohrdurchmessers auf das Übertragungsverhalten zu evaluieren, verjüngen sich die Querschnitte auf einer Länge von 3 m von 300 mm auf 200 mm bzw. 100 mm
- Umlenkungen und Abzweigungen: Um herauszufinden, wie sich Funkwellen bei verzweigten Kanalnetzen verhalten, werden eine U-förmige Umlenkung sowie T-Stücke mit- und ohne Blindende eingesetzt
- Volumenstromregler und Gittereinsätze: Um festzustellen, inwieweit Signale durch im Lüftungssystem eingesetzte Einbauten durch Streuung oder Abschirmung beeinträchtigt werden, werden Gittereinsätze mit unterschiedlichen Lochquerschnitten (10 mm, 3 mm) sowie Volumenstromregler bei verschiedenen Klappenstellungen eingesetzt. (siehe Abbildung 3-3)



Abbildung 3-3 Verwendete Gittereinsätze mit Lochquerschnitten von 10 mm und 3 mm; Volumenstromregler (geöffnet)

## 4 Messergebnisse

Die folgenden Diagramme zeigen die Messergebnisse aus den beschriebenen Versuchen. Die Messwerte beider Frequenzen werden dabei miteinander verglichen. Es wird jeweils die Häufigkeitsverteilung über der empfangenen Signalstärke (bei jeweils 400 versendeten Paketen) dargestellt. Die Signalstärke  $L_p$  wird in dBm angegeben. Die Signalstärke wird nach folgender Gleichung mit der Bezugsleistung 1 mWatt berechnet (4):

$$L_P[\text{dBm}] = 10 \log_{10}\left(\frac{P[\text{mW}]}{1 \text{ mW}}\right)$$

#### 4.1 Vergleich zwischen Funkübertragung im Kanal und im Freifeld

In Abbildung 4-1 sind die Häufigkeitsverteilungen der Versuche im Freifeld, im Gebäude und innerhalb des Lüftungskanals für beide Frequenzbänder gegenübergestellt. Die 868 MHz-Ergebnisse weisen dabei in allen drei Fällen eine höhere Signalstärke gegenüber den 2,4 GHz-Ergebnissen auf.

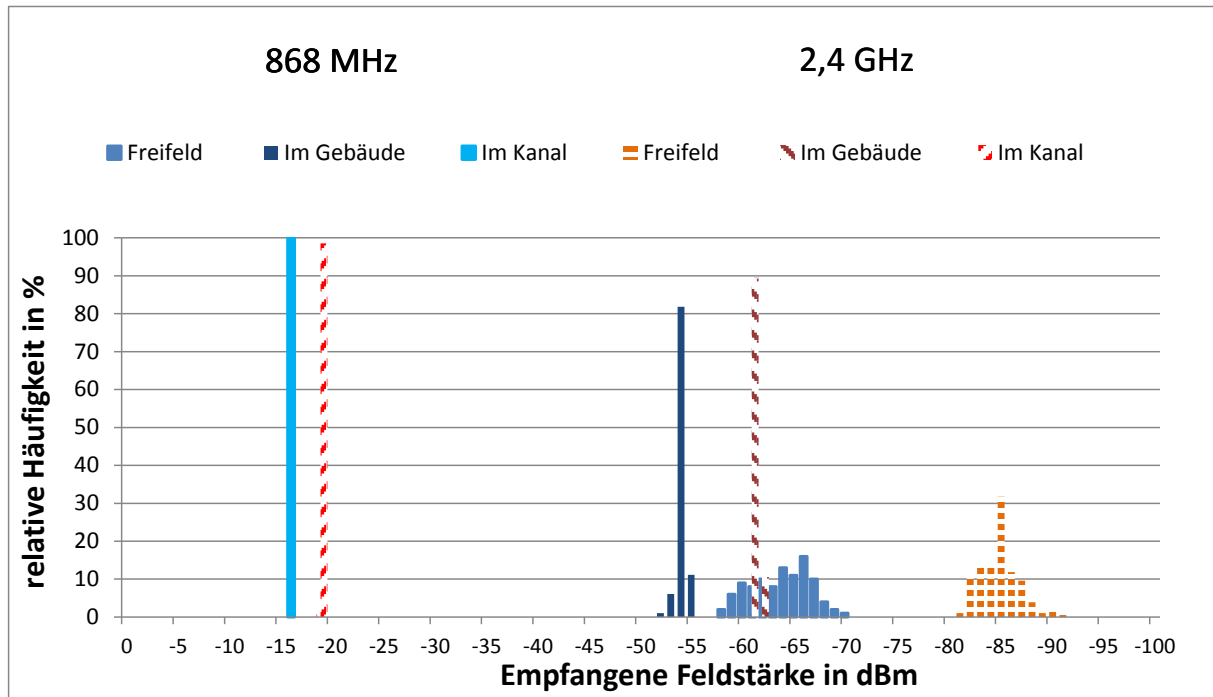


Abbildung 4-1 Signalstärkeverteilung der Vergleichsmessungen 868 MHz und 2,4 GHz im Freifeld, im Gebäude und im Kanal

Die dargestellten Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Signale im Kanal konstruktiv überlagert werden. Dadurch ergeben sich eine im Vergleich zum Freifeld stabilere Signalqualität und ein besseres Übertragungsverhalten.

#### 4.2 Signalverhalten bei Querschnittsverjüngungen

Wie im Abschnitt 3 beschrieben, wird der Einfluss verschiedener Querschnittsverjüngungen auf 200 mm bzw. 100 mm untersucht. Dabei ergeben sich die in Abbildung 4-2 dargestellten Messergebnisse. Zum Vergleich sind jeweils die Signalstärken im ursprünglichen 300 mm Kanal dargestellt.

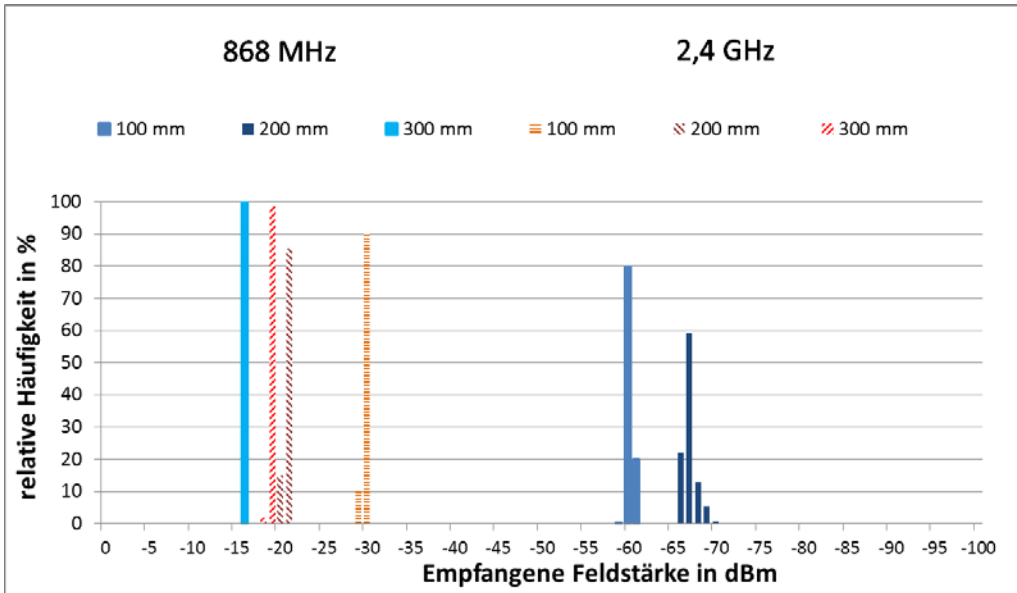


Abbildung 4-2 Signalstärkenverteilung bei verschiedenen Rohrdurchmessern

Bei der 2,4 GHz-Technologie lässt sich feststellen, dass die gemessenen Signalstärken beim Einsatz im 200 mm Kanal nur unwesentlich von den Messungen im Referenzkanal abweichen. Bei 100 mm Rohrdurchmesser sinkt die durchschnittliche Signalstärke um ca. 10 dBm ab. Die Streuung bleibt gering, was auf eine hohe Stabilität der Übertragung schließen lässt.

Die Vermessung des 868 MHz-Senders ergibt eine relativ große Abschwächung des empfangenen Signals um ca. 45 dBm bei 100 mm-Kanal bzw. ca. 50 dBm bei 200 mm Rohrdurchmesser.

#### 4.3 Signalverhalten bei Umlenkungen

In Abbildung 4-3 ist die Signalstärkenverteilung für Messungen im 300 mm-Kanal mit Umlenkungen zu sehen. Es ist zu erkennen, dass bei beiden Frequenzen kein signifikanter Unterschied zu den jeweiligen Referenzmessungen im geraden Kanal besteht. Auch der Einbau von T-Stücken mit Blindenden führt zu keiner wesentlichen Abschwächung der Signalstärken.

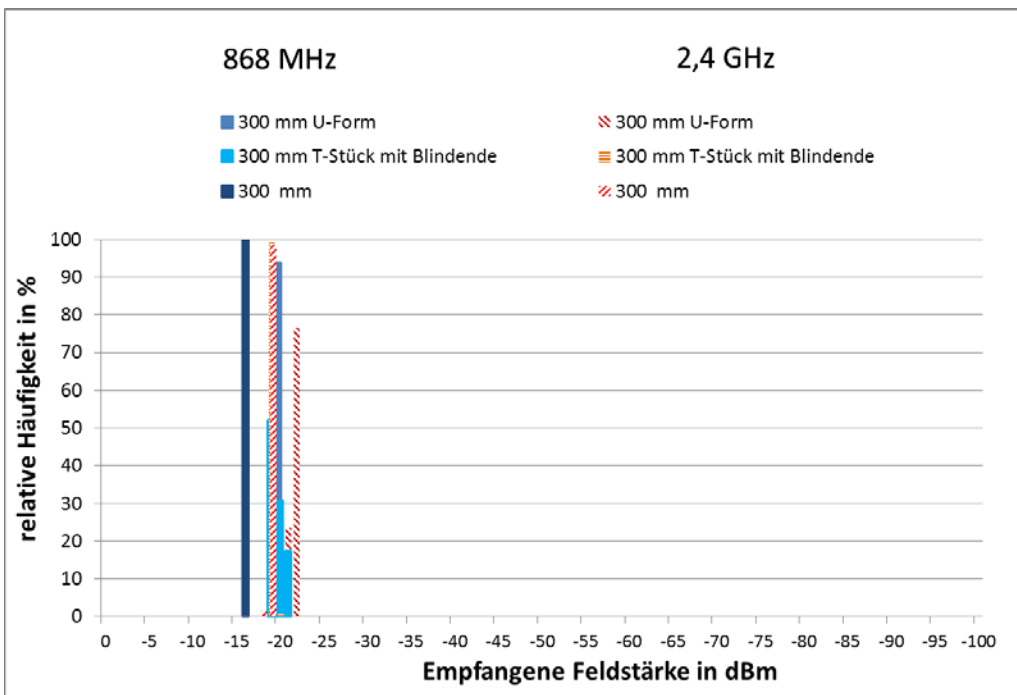


Abbildung 4-3 Signalstärkenverteilung bei verschiedenen Umlenkungen und einem Rohrdurchmesser von 300 mm

## 4.4 Signalverhalten bei verschiedenen Einbauten

In Lüftungskanälen befinden sich in der Regel verschiedene Einbauten zur Luftführung und Volumenstrommessung. Der Einfluss verschiedener solcher Einbauten auf die Signalqualität wird in diesem Kapitel dargestellt.

### 4.4.1 Gittereinsätze

Der Einfluss von verschiedenen Gittereinsätzen im geraden 300 mm-Kanal ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Es ist zu sehen, dass sich die empfangene Signalstärke abschwächt. Die Abschwächung fällt dabei bei der Frequenz von 868 MHz stärker aus, als bei 2,4 GHz.

Die gezeigten Ergebnisse lassen darauf schließen, dass Funksignale von Gittereinsätzen bei kürzeren Wellenlängen weniger stark abgeschirmt werden als bei längeren.

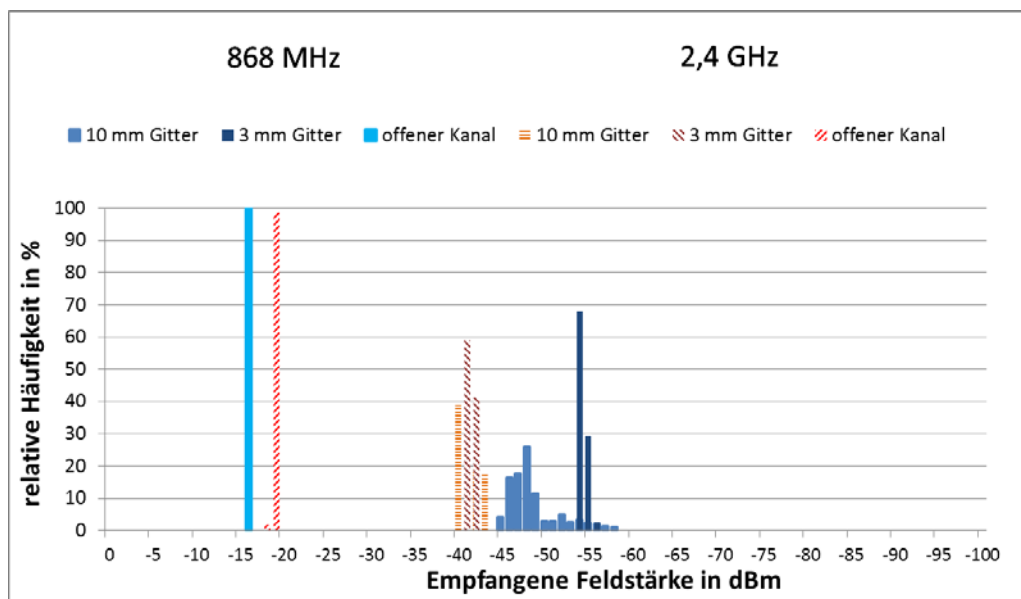


Abbildung 4-4 Signalstärkenverteilung bei verschiedenen Gittereinbauten und einem Rohrdurchmesser von 300 mm

### 4.4.2 Volumenstromregler

Der Einbau von Volumenstromreglern stellt einen Standardfall in der Lüftungstechnik dar. Volumenstromregler (vgl. Abschnitt 3.3) weisen dabei je nach Betriebsfall unterschiedliche Öffnungszustände des Drosselements auf und stellen somit unterschiedliche Hindernisse für das Funksignal dar. Abbildung 4-5 zeigt die Messwerte der Funkübertragungen bei verschiedenen Öffnungswinkeln des Klappenblattes im Volumenstromregler.

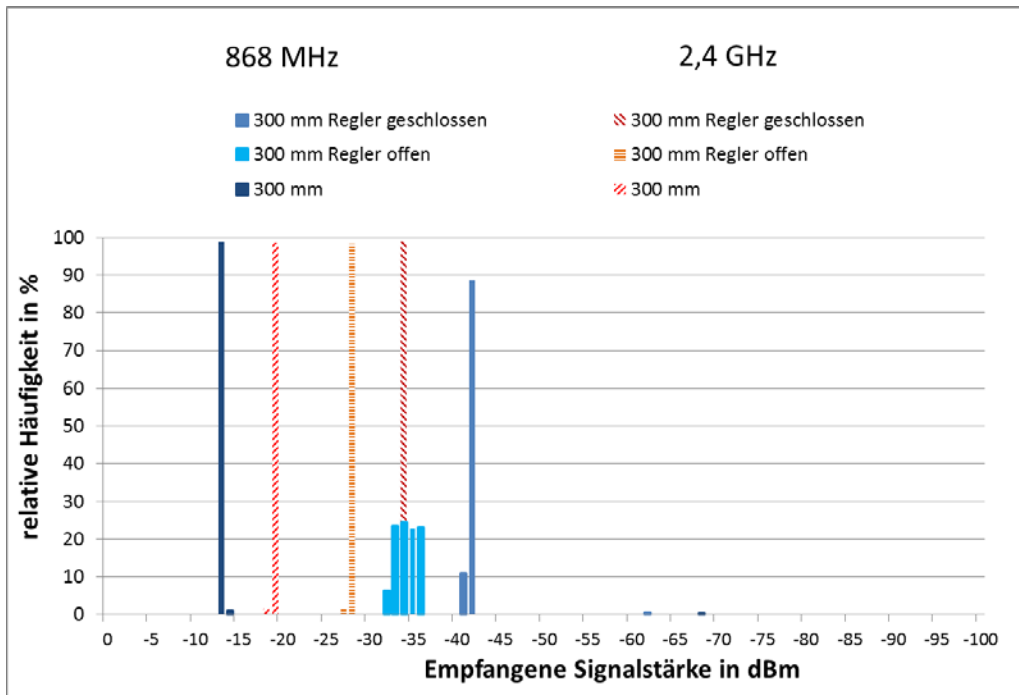


Abbildung 4-5 Signalstärkenverteilung bei Volumenstromreglern mit verschiedenen Öffnungswinkeln und einem Rohrdurchmesser von 300 mm

Es fällt auf, dass die Dämpfung der Signale mit 868 MHz stärker ausfällt, als bei 2,4 GHz. Bei 868 MHz werden die Signale sowohl bei offenen als auch bei geschlossenen Klappenstellungen relativ stark gedämpft. Insgesamt bleiben die Dämpfungen selbst bei komplett geschlossenen Klappen moderat. Die empfangene Sendeleistung ist in allen Fällen höher als die entsprechende Referenzmessung im Freifeld

## 5 Betrachtung der Lüftungskanäle als Übertragungsstrecke

Für die Funkdatenübertragung sind der technische Aufbau von Sender und Empfänger (Antenne, Antennenanbindung) sowie die Sendeleistung und die Empfängerempfindlichkeit von hoher Bedeutung. Auf die Dämpfung des Signals zwischen Sender und Empfänger kann jedoch bei herkömmlichen Übertragungswegen im Gebäude und im Freifeld wenig Einfluss genommen werden. (4).

Hohlleiter bieten eine planbare und bei hohen Frequenzen weitaus niedrigere Dämpfung des Signals. Hohlleiter sind im Wesentlichen (leitende) Metallrohre, die in Abmessung und Form so aufgebaut sind, dass sie elektromagnetische Wellen einer bestimmten Frequenz nahezu verlustfrei übertragen können (9). Hohlleiter werden üblicherweise bei Frequenzen über 3 GHz eingesetzt (10).

Jeder metallische Hohlleiter hat eine charakteristische Wellenlänge bzw. eine charakteristische Frequenz. Bei dieser Frequenz ist die Dämpfung im Hohlleiter minimal. Signale mit niedrigeren Frequenzen werden stark gedämpft, da die Wellenlänge größer ist als der Querschnitt im Kanal (9).

Bei runden Querschnitten berechnet sich die kritische Wellenlänge nach folgender Gleichung (9):

$$\lambda_K = 1,71 D$$

Somit kann auch die kritische Frequenz berechnet werden

$$f_K = \frac{c}{\lambda_K}$$

Die Grenzfrequenz eines Rohrs mit D=300 mm Durchmesser beträgt damit  $f_K \approx 0,58$  GHz, bei einem Durchmesser von D=200 mm  $f_K \approx 0,88$  GHz und bei einem Durchmesser von D=100 mm  $f_K \approx 1,75$  GHz.

Somit können unter Verwendung von 868 MHz-Sendern im 300 mm Kanal bei den verwendeten Frequenzen Hohlleitereffekte auftreten. Bei 2,4 GHz sind diese Effekte auch bei den kleineren Durchmessern zu erwarten. Diese Betrachtungen stimmen mit den Messergebnissen (siehe Kapitel 4.2) überein. Somit kann die höhere Signalstärke in Lüftungskanälen im Vergleich zum Freifeld auf Hohlleitereffekte zurückgeführt werden. Dadurch spielen Verzweigungen und Kurven des Kanals für die Übertragungsfähigkeit von Funksignalen keine wesentliche Rolle (vgl. Kapitel 4.3).

Dennoch kann bei der Übertragung von Funksignalen in Lüftungskanälen nicht von Hohlleitern im klassischen Sinne gesprochen werden. Bei der Gestaltung und dem Einsatz von Hohlleitern wird auf ein optimales Zusammenspiel zwischen verwendeter Geometrie, verwendeten Sendern und Empfängern sowie der verwendeten Frequenzen geachtet, um ein möglichst gutes Übertragungsverhalten zu erzielen (10). Bei der Planung, Auslegung und Installation von Lüftungskanälen spielen diese Kriterien jedoch keine Rolle.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die gezeigten Messergebnisse zur Funkübertragung in Lüftungskanälen zeigen auf, dass unter verschiedenen Randbedingungen eine stabile Signalqualität erzielt werden kann. Sowohl im verzweigten Kanal, als auch bei verschiedenen Hindernissen im Kanal (Gittereinsätze, Volumenstromregler) können bei gleicher Sendeleistung und gleicher Entfernung im Kanal höhere Signalstärken empfangen werden als im Freifeld.

Das Übertragungsverhalten ist von den geometrischen Eigenschaften des Lüftungskanals im Verhältnis zur Wellenlänge der verwendeten Funktechnologie abhängig. Als Kenngröße sollten die verfügbaren Lüftungsquerschnitte größer sein als die einfache Wellenlänge. Die Versuche zeigen, dass sich die 2.4 GHz Funktechnik bei kleineren Querschnitten trotz der größeren Freifeldämpfung als günstigerer Frequenzbereich erweist. Auch bei Kanaleinbauten ist eine Technologie mit geringer Wellenlänge von Vorteil.

Weitere Untersuchungen werden sich mit der Praxistauglichkeit und Anwendbarkeit der Kanalfunktechnologie im realen Gebäude beschäftigen. Zukünftige Einsatzgebiete können darauf abzielen, Sende- und Empfangseinrichtungen im Kanal mit anderen Einbauten oder Aktoren zu verbinden.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik. DIN EN 15232 - Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement. 2012nd ed. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
2. Frenzel T, Rohde J, Opfer J. BSI - Technische Richtlinie: Elektromagnetische Schirmung von Gebäuden - Praktische Messungen. Bonn: Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik; 2008.
3. Frenzel T, Rohde J, Opfer J. BSI - Technische Richtlinie: Elektromagnetische Schirmung von Gebäuden - Theoretische Grundlagen. Bonn: Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik; 2008.
4. Wollert J, Gebhardt W. Das Funkbuch: Evolution und Kommunikation. Löhne: Steute; 2010.
5. Dugré M, Freyer F, Anders A. BACnet und EnOcean für Energieeffiziente Gebäude: EnOcean; 2013 [cited 2014 Feb 17].
6. Texas Instruments. MSP430 Hardware Tools User's Guide. Dallas, Texas; 2013.
7. Texas Instruments. CC2590 Development Kit User's Guide. Dallas, Texas; 2010.
8. Texas Instruments. Smart RF Studio 7: Low Power RF Development Tools. Dallas, Texas; 2010.
9. Bürkle H. Grundlagen der Funktechnik. Heidelberg: Deckers Verlag; 1989.
10. Meyer M. Kommunikationstechnik: Konzepte der modernen Nachrichtenübertragung. 4., korr. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner; 2011.