

# Methode zur Quantifizierung der Leckrate (LRQ) für Schallkamas

**Toros Senan,**  
PhD. Acoustic Research Engineer

## Einführung

In vielen Anwendungsbereichen ist eine Leckerkennung erforderlich. Dazu gehören unter anderem Druckluftsysteme, die in zahlreichen Anwendungen zum Einsatz kommen und hauptsächlich in Produktionsanlagen verwendet werden.

## Auffrischung zur Funktionsweise der Schallkamas ii900/ii910

Die Schallkamas ii900/ii910 verwenden 64 Mikrofone, die in einer Anordnung (Array) in einem bestimmten Muster angeordnet sind. In der Mitte der Anordnung befindet sich eine Kamera für sichtbares Licht, die ein Bild der Umgebung macht. Das Gerät verwendet komplexe Algorithmen, um eine Schallabbildung oder ein Bild der Schallquellen aufzunehmen und die erzeugte Schallabbildung dann über das Sichtbild zu legen. Je nach der Position der Schallquelle im Sichtfeld der Schallkamas ii900/ii910 wird der Schall von jedem Mikrofon zeitlich leicht unterschiedlich empfangen. Durch diese Zeitunterschiede zwischen den Mikrofonen kann die Position der Schallquelle ermittelt werden: Wenn der Schall von der rechten Seite des Geräts kommt, empfangen die Mikrofone auf der rechten Seite der Anordnung den Schall um einen Bruchteil einer Sekunde früher als die Mikrofone auf der linken Seite. Die Schallkamas ii900/ii910 zeigen das Bild für dieses Schallereignis auf der rechten Seite des Bildschirms an.

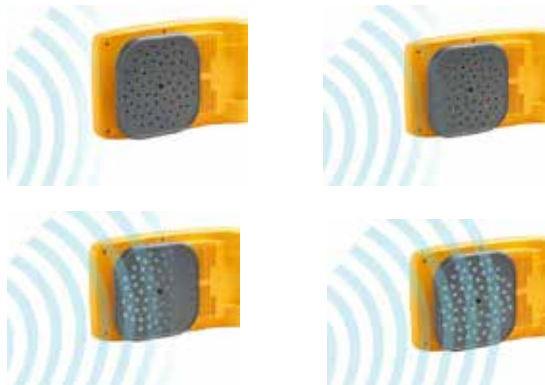
## Wie funktioniert die Lecksuche mit den Schallkamas ii900/ii910?

Tritt in einem unter Druck stehenden System ein Leck auf, verursachen die entweichenden Gas- bzw. Luftmoleküle Turbulenzen, die zu rapiden Veränderungen von Druck und Strömungsgeschwindigkeit führen. Diese Veränderungen können als Schallwellen übertragen werden. Die Schallkamas ii900/ii910 erkennen die Position und die Intensität dieser Schallwellen.

In die Umgebungsatmosphäre entweichende Druckluft erzeugt breitbandig Geräusche sowohl im hörbaren als auch im Ultraschallfrequenzbereich (Eret und Meske, 2012; Holstein und andere, 2016). In industriellen Druckluftsystemen sind schmalbandige Ultraschallsensoren (im Bereich von etwa 40 kHz) ein weit verbreitetes Hilfsmittel zur Lokalisierung von Lecks. Die Verwendung eines schmalbandigen Ultraschallsensors ist jedoch mit gewissen Einschränkungen verbunden.

Der Abstand zwischen dem Leck und dem Messgerät sowie der Messwinkel sind wesentliche Faktoren, die zur Effektivität des Ultraschallsensors beitragen: Zum einen wird der hochfrequente Schall durch atmosphärische Absorption stark gedämpft (siehe Wolstencroft und Neale, 2008).

Zum anderen variiert der durch ein Druckluftleck erzeugte Schalldruckpegel in Abhängigkeit vom Messwinkel (Wolstencroft und Neale, 2008). Darüber hinaus werden die Betriebseigenschaften schmalbandigen Ultraschallsensoren bekanntermaßen durch laute Umgebungen beeinträchtigt (Eret und Meske, 2012). Die Verwendung von breitbandigen Sensoren, die sowohl im hörbaren als auch im Ultraschallfrequenzbereich arbeiten, ermöglicht es dem Anwender, die oben genannten Einschränkungen zu kompensieren. Die vorhandene Flexibilität im Frequenzbereich erhöht die Unempfindlichkeit des Lecksuchsystems gegenüber Fehlern. In Abbildung 1 ist beispielsweise zu sehen, dass die aus der Öffnung austretende Druckluft bei einem Systemdruck von 6 bar ein breitbandiges Geräusch erzeugt. Abbildung 1 veranschaulicht, dass der Frequenzbereich mit dem größten gemessenen Schalldruckpegel im hörbaren Bereich liegt. Im Gegensatz dazu ist der im Frequenzbereich von 35 – 45 kHz gemessene Schalldruckpegel (rote gestrichelte Linien in Abbildung 1) deutlich niedriger als das übrige Frequenzspektrum.



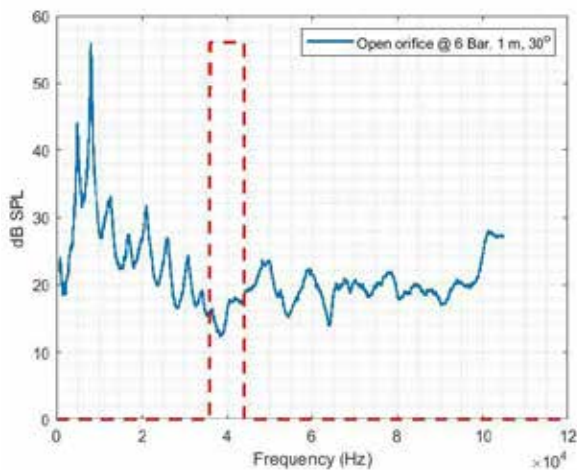


Abbildung 1: Druckluft, die durch eine Öffnung (1/4") entweicht. Die Messung erfolgte mit der Schallkamera ii910 aus einem Meter Entfernung von der Leckstelle mit einem Messwinkel von 30 Grad. Die blaue Linie zeigt das geglättete Spektrum und die rote gestrichelte Linie zeigt den Frequenzbereich um 40 kHz an.

Es gibt nur wenige Studien, die die Frequenzcharakteristik von Geräuschen durch Druckluftlecks untersuchen. In der Studie von Holstein und anderen (2016) wurden Frequenzspektren der Messungen von Druckluftlecks mit systematisch erhöhten Durchflussraten dargestellt (siehe Abb. 2 in Holstein und anderen, 2016). Als Leckquelle wurde eine runde Öffnung verwendet, und die Messungen wurden in einem Abstand von 20 cm von der Quelle durchgeführt. Die Frequenzspektren zeigen, dass mit zunehmender Durchflussrate die Energie oberhalb von 50 kHz ansteigt. Für die größte im Experiment gemessene Durchflussrate weist das Frequenzspektrum eine Spitze bei etwa 80 kHz auf.

## Faktoren, die die Leckerkennung beeinflussen

Faktoren, die die Leckerkennung beeinflussen, werden im vorliegenden Abschnitt separat beschrieben. Es sei darauf hingewiesen, dass die im vorliegenden Abschnitt erläuterten Faktoren miteinander interagieren und als einzelne Komponenten eines breit gefächerten komplexen Phänomens betrachtet werden sollten.

## Faktoren für Leckquellen:

### 1. Systemdruck

Im Allgemeinen gilt: Je höher der Systemdruck, desto größer ist das Leck. Dies führt zu einer höheren Schallintensität und erleichtert so die Erkennung.

### 2. Durchflussrate

Analog zum Druck gilt: Je höher die Durchflussrate des Systems ist, desto größer ist das Leck. Dies führt zu einer höheren Schallintensität, die an der Leckstelle gemessen wird. Eine höhere Schallintensität erleichtert die akustische Erkennung.

### 3. Größe und Form der Öffnung

Die Größe und Form der Öffnung müssen zusammen betrachtet werden. Angesichts der Vielzahl potenzieller Luftlecks gestaltet es sich schwierig, eine Richtlinie für die Auswirkung von Form und Größe auf die Leckerkennung zu erstellen. In dieser Liste sind einige der möglichen Leckquellen aufgeführt. Sowohl die Größe als auch die Form der Öffnung unterscheiden sich bei den einzelnen Einträge in der Liste: Luftschläuche und Luftschlauch-Anschlüsse oder -Kupplungen

- Verschlissene Trennschalter oder Trennschalter mit fehlenden O-Ringen
- Unsachgemäß installierte Filter, Schmiervorrichtungen und Regler
- Offene Abblasvorrichtungen
- Offene Kondensatabscheider
- Undichte oder fehlerhaft verlegte Abflüsse
- Fehlerhafte oder minderwertige Gewindedichtmittel oder falsch aufgetragene Gewindedichtmittel
- Steuer- und Absperrventile
- Verschlissene Dichtungen oder Dichtringe
  - Alte oder schlecht gewartete Druckluftwerkzeuge
  - Stillgelegte oder ungenutzte Maschinen oder Produktionsausrüstung mit Lufteingang

Gas	Formel	Dichte (kg/m³)
Ethin (Acetylen)	C <sup>2</sup> H <sup>2</sup>	1,173
Luft	-	1,2929
Ammoniak	NH <sup>3</sup>	0,7710
Argon	A	1,7837
Kohlendioxid	CO <sup>2</sup>	1,977
Kohlenmonoxid	CO	1,250
Chlor	Cl <sup>2</sup>	3,214
Ethan (10 °C)	C <sup>2</sup> H <sup>6</sup>	1,356
Ethylen	C <sup>2</sup> H <sup>4</sup>	1,260
Helium	He	0,1785
Wasserstoff	H <sup>2</sup>	0,0899
Schwefelwasserstoff	H <sup>2</sup> S	1,539
Methan	CH <sup>4</sup>	0,7168
Neon	Ne	0,9003
Stickstoffmonoxid (10 °C)	NO	1,34
Stickstoff	N <sup>2</sup>	1,2506
Stickstoffdioxid	N <sup>2</sup> O	1,977
Sauerstoff	O <sup>2</sup>	1,429
Propan	C <sup>3</sup> H <sup>8</sup>	2,9009
Schwefeldioxid	SO <sup>2</sup>	2,927
Wasserdampf (100 °C)	H <sup>2</sup> O	0,598
Schwefelhexafluorid**	SF <sup>6</sup>	6,17
Kältemittel R134a***	CH <sup>2</sup> FCF <sup>3</sup>	14,433

Tabelle 1: Liste der Dichte gasförmiger Stoffe Dichte bei 0 °C und 1 atm\* (101,325 kPa)

\*Handbook of Chemistry and Physics. 48. Ausgabe

\*\*[https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur\\_hexafluoride](https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_hexafluoride)

\*\*\*[https://www.engineeringtoolbox.com/r134a-properties-d\\_1682.html](https://www.engineeringtoolbox.com/r134a-properties-d_1682.html)

## Flüssigkeitseigenschaften

Die Flüssigkeitseigenschaften beeinflussen den erzeugten Schall beim Austritt aus dem Leck.

### 4. Dichte

Die folgende Tabelle zeigt die Dichte gasförmiger Stoffe in kg/m<sup>3</sup> bei 0 °C beim Druck von 1 atm (101,325 kPa). Die Gasdichte hat Einfluss auf die Schallintensität des Lecks. Die geringe Dichte von Helium beispielsweise bedeutet, dass im Vergleich zur Druckluft bei gleicher Durchflussrate und gleichem Druck die an der Leckstelle gemessenen Schalldruckpegel niedriger sind. Die Erfahrung in der Praxis bestätigt, dass das Erkennen eines Heliumlecks eine Herausforderung darstellt.

### 5. Viskosität

Die Viskosität des Gases beeinflusst den Schalldruckpegel an der Leckstelle. Allerdings sind die Auswirkungen geringer als die der Dichte.

### 6. Umgebungstemperatur

Die Umgebungstemperatur muss sowohl an der Leckquelle als auch auf dem Weg berücksichtigt werden. Für die Leckquelle gilt, dass die Umgebungstemperatur Einfluss auf die Dichte und die Viskosität hat. Beide Faktoren verändern den Schalldruckpegel an der Leckstelle. Mit dem Anstieg der Umgebungstemperatur steigt die kinetische Energie der Moleküle, wodurch sich die Schallintensität am Leck erhöht.

### 7. Umgebungsdruck

Der Umgebungsdruck hat einen direkten Einfluss auf die Gasdichte. Eine Verringerung des Umgebungsdrucks hat eine niedrigere Dichte zur Folge, was wiederum die Schallintensität am Leck reduziert.

### 8. Entfernung des Lecks zur Kamera

Der Messabstand beeinflusst den gemessenen Schalldruckpegel. Während sich der Schall von der Quelle in alle Richtungen ausbreitet, nimmt die Intensität mit zunehmender Entfernung ab.

### 9. Umgebungstemperatur

Veränderungen der Umgebungstemperatur können sich sowohl auf die Dichte des Gases als auch auf die Viskosität auswirken. Beides beeinflusst wiederum die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls im Medium. Mit steigender Temperatur breitet sich der Schall schneller aus. Die Änderung der Umgebungstemperatur gehört zu den Mechanismen, die den Anteil der von der Atmosphäre absorbierten Schallenergie beeinflussen. Bei niedrigen Frequenzen und kurzen Entfernungen ist der Einfluss der Temperatur auf die Luftabsorption vernachlässigbar (Harris, 1966). Allerdings kann sich bei sehr hohen Frequenzen und großen Entfernungen der Schalldruckpegel erheblich verringern (Vladišauskas und Jakevičius, 2004).

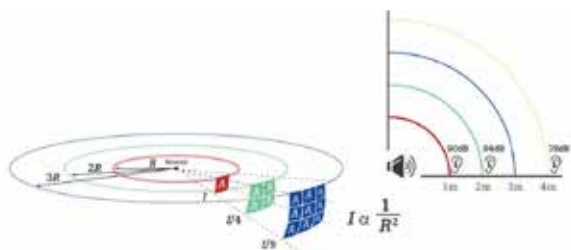
### 10. Feuchtigkeit

Der zweite Mechanismus, der sich auf den Schalldruckpegel aufgrund der Luftabsorption auswirkt, ist die Luftfeuchtigkeit. Wie die Umgebungstemperatur wirkt sich auch die Luftfeuchtigkeit unter normalen Bedingungen nur geringfügig auf den Schalldruckpegel aus (Harris, 1966). Die Auswirkungen sind bei sehr hohen Frequenzen und hoher Luftfeuchtigkeit (Vladišauskas und Jakevičius, 2004) spürbar.

### 11. Umgebungsdruck

Der Umgebungsdruck hat bei einer Annäherung an ein ideales Gas keinen Einfluss auf den Schalldruckpegel, da sowohl die Luftdichte als auch der Gasdruck ähnliche, aber inverse Auswirkungen auf die Schallgeschwindigkeit haben. Die beiden Faktoren heben sich auf. Daher ist aufgrund des Umgebungsdrucks kein Unterschied beim Schalldruckpegel des Lecks und der Messposition zu erwarten.

## Path factors and atmospheric effects



Eine Verdoppelung der Entfernung zwischen der Schallquelle und der Messposition im Freifeld vermindert die Schallintensität um 6 dB.

## Welche Eigenschaften von Lecks werden von den Schallkameras ii900/ii910 erfasst?

Die Schallkameras ii900/ii910 zeigen die Art des Lecks an und ermitteln die Durchflussrate des Lecks anhand der akustischen Eingangsgrößen. Für die Entwicklung der Algorithmen zur Klassifizierung der Art des Lecks und zur Vorhersage der Durchflussrate wurde eine Reihe von Laborexperimenten entworfen und durchgeführt.



## Klassifizierung der Art der Lecks in ii900/ii910

Die Schallkameras ii900 und ii910 klassifizieren die erfassten akustischen Daten von Lecks basierend auf dem Ort, an dem sie auftreten: Schlauch, offenes Ende, Schnellanschluss und Gewindekupplung. Vier Klassifizierungen, bzw. die vier Arten von Lecks, wurden am Ende eines Druckluftschlauchsystems installiert und die akustischen Messungen in einer halb schalldichten Kammer durchgeführt. Zwei Beispiele des Versuchsaufbaus sind in Abb. 3 und Abb. 4 dargestellt. Die Anschlüsse, die die vier Bedingungen für die Lecks für das Experiment bildeten, sind in Abb. 5 dargestellt.

1. **Schlauch:** Das elastische Schlauchmaterial ermöglicht eine einfache Verlegung von Schlauchverbindungen. Im Gegensatz zu Metall- und Messingrohr handelt es sich jedoch um ein empfindlicheres Material. Daher entstehen leicht individuelle Einschnitte und Löcher entlang der Schläuche, mit denen ein Luftverdichter an pneumatische Geräte angeschlossen ist. Zur Erfassung der akustischen Daten des Schlauchlecks für die Klassifizierung und Vorhersage der Durchflussrate wurde ein schlitzförmiges Schlauchleck verwendet (Abb. 3 und Abb. 5a).
2. **Offen:** Ein Schlauch mit offenem Ende oder eine Öffnung sind die gängigsten Arten von Lecks, die in wissenschaftlichen Studien verwendet werden (Referenzen). Sie treten auf, wenn ein Schlauch-/Rohrabschnitt des Druckluftsystems offen gelassen wird. In der Entwicklungsphase der Schallkamera ii900 wurde ein Schlauch mit offenem Ende für Experimente zur Klassifizierung und Vorhersage der Durchflussrate verwendet (Abb. 4 und Abb. 5b).
3. **Schnellanschluss:** Schnellanschlüsse, auch bekannt als Schnelltrenn- oder Schnelllösekupplungen, ermöglichen einfache und schnelle Verbindungen. Die Schnellanschlüsse nutzen Verankerungen, die sich in eine Richtung schieben lassen, während sie sich in der entgegengesetzten Richtung nicht verschieben lassen. Häufig ist eine oder mehrere dieser inneren Verankerungen beschädigt und es kommt zu einem Druckluftaustritt durch den Schnellanschluss. Dadurch verteilt sich die Luft um den Anschluss und die Austrittsrichtung der Luft variiert je nach Verformung. Bei der Entwicklung der Algorithmen für die Klassifizierung und Vorhersage der Durchflussrate durch die Schallkameras ii900/ii910 wurde ein verformter Schnellanschluss für akustische Messungen verwendet (Abb. 5c).
4. **Gewindekupplung:** Üblicherweise wird eine Endkappe mit Gewinde für die Endpunkte eines Druckluftsystems verwendet. Diese Endkappen müssen sorgfältig platziert und im Hinblick auf die Anzahl der Gewingegänge im Endrohr entsprechend eingestellt werden. Gelegentlich werden diese Endkappen nicht fest verschlossen. Zudem können sich diese Kappen bei mehrfacher Nutzung verformen. In solchen Fällen weicht die Druckluft durch die Endkappe aus, was sich nachteilig auf die Effizienz des Systems auswirkt. In den Versuchen wurde eine lose aufgesetzte Gewinde-Endkappe als Quelle des Lecks verwendet (Abb. 5d).



Abbildung 3: Die Art des Lecks am Schlauchs wird in einem Winkel von 30 Grad gemessen.

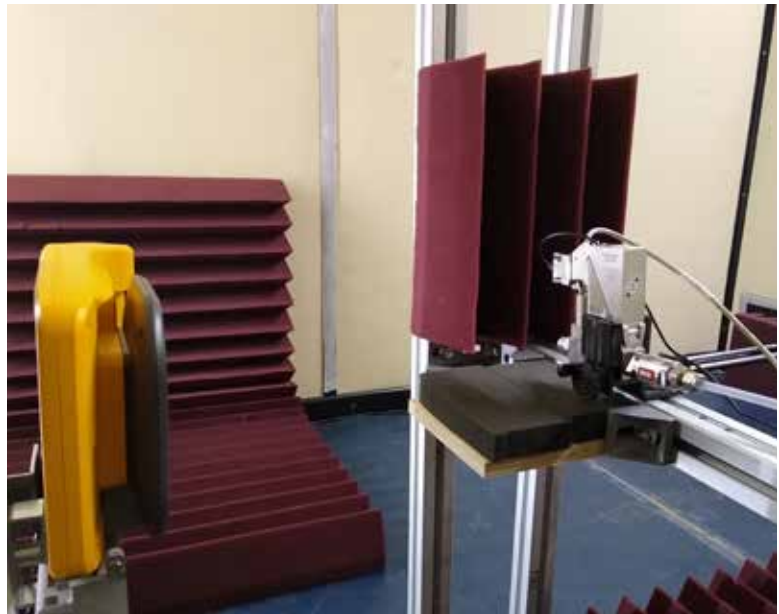


Abbildung 4: Experimenteller Aufbau einer Leckmessung mit einem offenen Ende in einem Winkel von 90 Grad.



Abbildung 5: Die vier Arten von Lecks, die während der Experimente untersucht wurden: Schlauch (a), offenes Ende (b), Schnellanschluss (c) und Gewindekupplung (d).

## Quantifizierungsindex der Leckrate

Die Schallkameras ii900/ii910 liefern eine Schätzung der Durchflussrate an der Leckstelle basierend auf den erfassten akustischen Daten. Die Algorithmen für die Durchflussrate wurden auf Grundlage der Ergebnisse der Labormessungen, die in der halb schalldichten Kammer durchgeführt wurden, entwickelt. Aufgrund der unterschiedlichen akustischen Eigenschaften der einzelnen Arten von Lecks gibt es für jede Art einen eigenen Algorithmus zur Vorhersage der Durchflussrate. Folglich greifen die Algorithmen zur Schätzung der Durchflussrate erst nach der Klassifizierungsphase.

Die vorhergesagte Durchflussrate einer Leckart wird dann in den Index zur Quantifizierung der Leckrate (LRQ) umgewandelt. Der Quantifizierungsindex der Leckrate kann Werte zwischen 0 und 10 haben. Der höhere LRQ-Wert zeigt eine höhere Durchflussrate am Leck an und ist als Reparaturvorschlag zu werten.

## Fazit

Die Schallkameras ii900/ii910 sind einfach bedienbare, handliche Diagnosegeräte mit effizientem Frequenzbereich. Hiermit kann man viele Herausforderungen bei der Suche und Quantifizierung von Lecks deutlich besser bewältigen. Die Bestimmung der Leckrate (LRQ) ist entscheidend für die Aufrechterhaltung der Effizienz des Druckluftsystems, und die Berichtsfunktionen verbessern die Qualität und Geschwindigkeit der Kommunikation zwischen den Technikern.

## Referenzen

Eret, P., & Meskell, C. (2012). Microphone arrays as a leakage detection tool in industrial compressed air systems. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012.

Harris, C. M. (1966). Absorption of sound in air versus humidity and temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 40(1), 148-159.

Holstein, P., Barth, M. und Probst, C. (2016). Acoustic methods for leak detection and tightness testing. In *Proceedings, 19th World Conference on Non-Destructive Testing* (S. 13-17ff.).

Vladišauskas, A., & Jakevičius, L. (2004). Absorption of ultrasonic waves in air. *Ultragarsas*, 50(1), 46-49.

Wolstencroft, H., & Neale, J. (2008). Characterisation of compressed air leaks using airborne ultrasound. *Proceedings of Acoustics (AAS'08)*.

**Fluke.** *Damit Ihre Welt  
intakt bleibt.®*

### Fluke Deutschland GmbH

In den Engematten 14  
79286 Glottertal  
Telefon: 0 69 2 2222 0203  
E-Mail: CS.Deutschland-ELEK@Fluke.com  
E-Mail: CS.Deutschland-INDS@Fluke.com  
www.fluke.de

### Technischer Beratung:

Beratung zu Produkteigenschaften,  
Spezifikationen, Messgeräte und  
Anwendungsfragen  
Tel.: +49 (0) 7684 8 00 95 45  
E-Mail: techsupport.dach@fluke.com

### Fluke Austria GmbH

Liebermannstraße F01  
2345 Brunn am Gebirge  
Telefon: +43 (0) 1 928 9503  
E-Mail: roc.austria@fluke.nl  
www.fluke.at

### Fluke (Switzerland) GmbH

Industrial Division  
Hardstrasse 20  
CH-8303 Bassersdorf  
Telefon: +41 (0) 44 580 7504  
E-Mail: info@ch.fluke.nl  
www.fluke.ch

©2020-2021 Fluke Corporation. Alle Rechte  
vorbehalten. Änderungen vorbehalten.  
06/2021 210581-de

Dieses Dokument darf nicht ohne die schriftliche  
Genehmigung der Fluke Corporation geändert  
werden. Genehmigung durch die Fluke Corporation  
geändert werden.