

# Konduktive Leitfähigkeitsmessung

## Einführung für die Projektierung und Anwendung

Dipl. Ing. Otto Wohner

Anwendungen  
Begriffe  
Messverfahren  
Tabellen

---

---

## 1. Anwendungsbereich

Die Leitfähigkeit einer Flüssigkeit ist ein Maß für die Menge der elektrisch leitenden, gelösten Substanzen. Sie erlaubt jedoch keinen Rückschluss auf die Art dieser Substanz. Voraussetzung ist eine möglichst geringe Eigenleitfähigkeit des reinen Mediums und eine gelöste Substanz, welche die Fähigkeit besitzt, Ionen zu bilden.

Medium ist in den meisten Anwendungsfällen Wasser, welches in reiner Form eine sehr geringe Eigenleitfähigkeit von  $0,0548\mu\text{S}/\text{cm}$  bei  $25^\circ\text{C}$  besitzt.

Einige Beispiele sollen den breiten Anwendungsbereich der Leitfähigkeitsmessung verdeutlichen.

### 1.1 Meerwasser-Aufbereitung

Soll Meerwasser zu Trinkwasser aufbereitet werden, muss eine Entsalzung durchgeführt werden. Meerwasser besitzt durch den Salzgehalt eine Leitfähigkeit von  $10 \dots 100\text{mS}/\text{cm}$ . Für Trinkwasser ist die gesetzliche Obergrenze gemäß Trinkwasserverordnung) auf  $2000\mu\text{S}/\text{cm}$  festgelegt. Die ordnungsgemäße Entsalzung muss deshalb unbedingt laufend durch eine Leitfähigkeitsmessung des entsalzten Wassers überprüft werden.

### 1.2 Spülprozesse

In der Getränkeherstellung müssen Rohrsysteme und Abfüllanlagen regelmäßig mit Reinigungslaugen gespült werden. Anschließend erfolgt eine Nachspülung mit Leitungswasser. Über eine Leitfähigkeitsmessung kann überwacht werden, ob die Nachspülung einen völligen Abbau der Reinigungslauge bewirkt hat und somit die Produktion wieder aufgenommen werden kann.

### 1.3 Konservierung

Bei der Konservierung von Lebensmitteln wird häufig auf Salz- oder Essiglösungen zurückgegriffen. Über die Leitfähigkeitsmessung kann auch in einem kontinuierlichen Prozess sichergestellt werden, dass mit einer gleichbleibenden Lösung gearbeitet wird.

### 1.4 Oberflächenwasser

Oberflächenwasser besitzt eine Leitfähigkeit, die je nach Ort und Beschaffenheit im Bereich  $0,1 \dots 1\text{mS}/\text{cm}$  liegt. Bei ungestörten Verhältnissen ist dieser Wert weitgehend konstant. Erhöht sich der Wert plötzlich, kann daraus geschlossen werden, dass eine unzulässige Einleitung von Prozesswässern stattgefunden hat. Es kann also über die Leitfähigkeitsmessung eine Umweltkontrolle realisiert werden.

## 2. Begriffsbestimmung

### 2.1 Leitfähigkeit

Alle Stoffe mit beweglichen Ladungsträgern (Elektronen oder Ionen,) haben auch einen messbaren ohmschen Widerstand. Die Größe dieses Widerstandes ist abhängig vom materialabhängigen spezifischen Widerstand  $\rho$  und von den geometrischen Abmessungen des Leiters.

Der Widerstand eines Leiters errechnet sich wie folgt:

$$R [\Omega] = \frac{\rho \left[ \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \right] \cdot l [\text{m}]}{A [\text{mm}^2]} \quad \text{oder} \quad \text{Widerstand} = \frac{\text{spez. Widerstand} \cdot \text{Leiterlänge}}{\text{Leiterquerschnitt}}$$

Der Leitwert, gemessen in Siemens (S), ergibt sich als Kehrwert des elektrischen Widerstandes.

$$G [\text{S}] = \frac{1}{R [\Omega]} \quad \text{oder} \quad \text{Leitwert} = \frac{1}{\text{Widerstand}}$$

Analog dazu ergibt sich die Leitfähigkeit als Kehrwert des spezifischen Widerstandes.

$$\gamma \left[ \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \right] = \frac{1}{\rho \left[ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \right]} \quad \text{oder} \quad \text{Leitfähigkeit} = \frac{1}{\text{spez. Widerstand}}$$

Alternativ zu dem griechischen Buchstaben  $\gamma$  wird auch  $\delta$  oder  $\kappa$  verwendet.

Die Leitfähigkeit von Flüssigkeiten wird üblicherweise in  $\mu\text{S}/\text{cm}$  oder  $\text{mS}/\text{cm}$  gemessen, wobei der Zusammenhang  $1000\mu\text{S}/\text{cm} = 1\text{mS}/\text{cm} = 100\text{mS}/\text{m}$  besteht. Normalerweise wird für die Auswertung der Leitfähigkeit (z.B. Konzentrationsbestimmung) nicht die absolute Leitfähigkeit benötigt, da diese stark temperaturabhängig ist. Vielmehr arbeitet man mit einer auf eine Referenztemperatur von  $25^\circ\text{C}$  bezogenen Leitfähigkeit. In alten Anlagen oder Veröffentlichungen taucht auch noch die Referenztemperatur von  $20^\circ\text{C}$  auf. Diese wird heute aber nicht mehr verwendet.

Es wird also immer die Leitfähigkeit ermittelt, die das Medium bei  $25^\circ\text{C}$  hat. Für ein besseres Verständnis wird von uns nicht der griechische Buchstabe  $\gamma$  verwendet, sondern das Kürzel LF.

## 2.2 Temperaturkoeffizient

Viele Lösungen haben über einen großen Temperaturbereich ein annähernd lineares Temperaturverhalten. Für die Normierung der Leitfähigkeit auf 25°C kann daher mit einem linearen Temperaturkoeffizient (TK) gearbeitet werden.

Die Einheit ergibt sich damit zu :

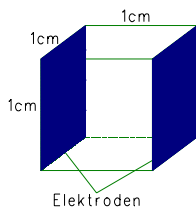
$$TK \left[ \frac{\%}{^{\circ}C} \right]$$

Bei Lösungen mit stark nichtlinearem Temperaturverhalten ist es ratsam, die Temperaturkompensation auf die Arbeitstemperatur einzustellen. Dazu wird der Temperaturkoeffizient solange verändert, bis die angezeigte Leitfähigkeit bei Arbeitstemperatur mit der bei 25°C übereinstimmt.

Alternativ kann auch eine nichtlineare Temperaturkompensation verwendet werden. Das nichtlineare Verhalten des Medium wird dann durch ein Polynom 4. Ordnung oder durch eine Geradenannäherung kompensiert.

## 2.3 Zellenkonstante

Das Messergebnis einer Leitfähigkeitsmessung hängt direkt von der Geometrie der Leitfähigkeitsmesszelle ab. Um diese Abhängigkeit zu eliminieren, ist es notwendig, die "Zellenkonstante" der Messzelle zu berücksichtigen. Bei der Leitfähigkeitsmesszelle stehen sich in der Regel 2 Elektrodenflächen der Größe  $A[\text{cm}^2]$  in einem Abstand  $X[\text{cm}]$  gegenüber. Die Zellenkonstante ist dann definiert als Quotient  $X/A$ . In der Praxis kann die Zellenkonstante, bedingt durch komplizierte geometrische Abmessungen, oftmals nur messtechnisch ermittelt werden.



$$A = 1 \text{ cm} * 1 \text{ cm} = 1 \text{ cm}^2$$

$$X = 1 \text{ cm}$$

$$C = X/A = 1 \text{ cm} / 1 \text{ cm}^2 = 1 \text{ cm}^{-1}$$

### Zusammenhang Messbereich <-> Zellenkonstante

| Leitfähigkeits-Messzelle | Zellenkonstante $[\text{cm}^{-1}]$ | Elektroden-material | Messprinzip | Messbereich                           |
|--------------------------|------------------------------------|---------------------|-------------|---------------------------------------|
| 2605                     | 0,1                                | Edelstahl           | 2-Pol.      | 2 bis 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$     |
| 4603                     | 0,5                                | Spezial Graphit     | 4-Pol.      | 5 $\mu$ bis 500 $\text{mS}/\text{cm}$ |
| 2105                     | 1,0                                | Spezial Graphit     | 2-Pol.      | 0,2 bis 20 $\text{mS}/\text{cm}$      |
| 2205                     | 2,5                                | Spezial Graphit     | 2-Pol.      | 0,5 bis 50 $\text{mS}/\text{cm}$      |

---

---

## 2.4 Polarisierung

Unter dem Begriff Polarisierung bzw. Polarisierungseffekt sind alle störenden Vorgänge zusammengefasst, die an der Grenzfläche Elektrode  $\leftrightarrow$  Medium auftreten. Die Polarisierung steigt mit dem Messstrom und der Leitfähigkeit, sie sinkt mit der Messfrequenz. Außerdem ist der Polarisierungseffekt stark vom Material der Elektroden abhängig. Edelstahlelektroden sind wegen des Polarisierungseffektes nur für den Einsatz im untersten Leitfähigkeitsbereich (bis ca.  $100\mu\text{S}/\text{cm}$ ) geeignet. Für größere Leitfähigkeitsbereiche eignen sich Graphit und platinierteres Platin als Elektrodenmaterial. Platinelektroden sind mechanisch sehr empfindlich. Die Platinierung ist nicht wischfest und darf auch nicht austrocknen. Für den stationären Einsatz ist daher Edelstahl oder Graphit am besten geeignet.

## 3. Messverfahren

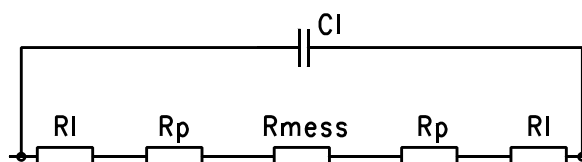
### 3.1 2-Elektroden-Messzelle

Die 2-Elektroden-Messzelle besteht aus 2 gegenüber- oder nebeneinander liegenden Elektroden. Die Geometrie kann je nach Anwendungsfall sehr unterschiedlich stark variieren. An die beiden Elektroden wird eine Wechselspannung angelegt (Gleichspannung würde aufgrund elektrochemischer Prozesse zur Zerstörung der Elektroden führen). Der Strom, der zum fließen kommt, ist dann ein Maß für die Leitfähigkeit.

2-Elektroden-Messzellen sind sehr gut geeignet für Messungen von Lösungen mit geringer Leitfähigkeit. Polarisierungseffekt und Leitungswiderstand können dabei vernachlässigt werden. Kleine Zellenkonstanten lassen sich bei diesen Messzellen problemlos realisieren.

Für die Messung größerer Leitfähigkeiten ist die 2-Elektroden-Messzelle weniger gut geeignet, weil mit zunehmender Leitfähigkeit das Messergebnis durch Leitungswiderstände und Polarisierungseffekte an den Grenzflächen der Elektroden verfälscht wird.

Ersatzschaltbild  
(vereinfacht)



|                   |  |
|-------------------|--|
| $R_I$             | Leitungswiderstand                         |
| $R_p$             | Polarisationswiderstand (Frequenzabhängig) |
| $C_I$             | Kabelkapazität                             |
| $R_{\text{mess}}$ | Widerstand des Mediums                     |

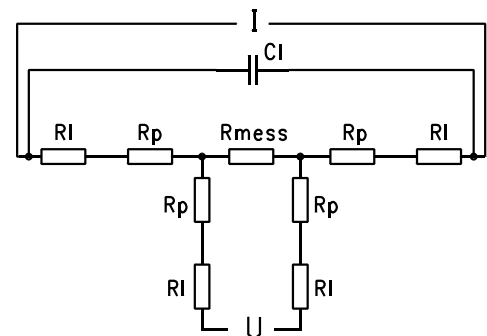
### 3.2 4-Elektroden-Messzelle

Die 4-Elektroden-Messzelle besteht aus 4 Elektroden. Davon sind 2 Elektroden stromführend, die beiden anderen Elektroden werden als Spannungselektroden verwendet. Sie tasten hochohmig innerhalb des Mediums die Spannung ab. Diese wird als Istwert auf einen geschlossenen Regelkreis der Auswerteelektronik zurückgeführt. Die an den Stromelektroden anliegende Messspannung wird soweit nachgeregelt, dass die Verluste durch Leitungswiderstände und Polarisierungseffekt auskompensiert werden. Die wesentlichen Fehlerquellen sind somit eliminiert. Deshalb kann man bei 4-Elektroden Messzellen mit einer einzigen Zellenkonstante einen großen Leitfähigkeitsbereich abdecken. Bedingt durch diese Nachregelung ist diese Messmethode auch gegen Verschmutzung der Elektroden weitestgehend unempfindlich.

Bei der Geometrie der Messzelle ist zu beachten, dass durch die Spannungselektroden kein Strom fließen darf. Ihre Lage muß also so gewählt werden, dass sie keine Stromlinien der Stromelektroden berühren.

Ersatzschaltbild  
(vereinfacht)

- RI= Leitungswiderstand
- Rp= Polarisationswiderstand (Frequenzabhängig)
- CI= Kabelkapazität
- Rmess=Widerstand des Mediums
- I=Anschluss Stromelektrode
- U=Anschluss Spannungselektrode



### 3.3 Temperaturmessung

Bedingt durch die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit ist es für ein genaues Messergebnis unbedingt notwendig, stets auch die Temperatur des Mediums zu messen. Für einfache Messungen kann die Temperatur mittels NTC-Widerstand oder Halbleiterfühler erfasst werden. Um eine bessere Genauigkeit zu erreichen, sollte hierfür ein Pt100 oder Pt1000 Temperatursensor eingesetzt werden. Der Temperatursensor soll die Temperatur des Mediums unverfälscht und mit kurzen Verzugszeiten erfassen.

## 4. Zahlenmaterial

### 4.1 Referenzlösungen

Für die Überprüfung der Leitfähigkeits-Messzellen eignen sich am besten sogenannte Referenzlösungen. Üblicherweise wird hierzu eine KCL-Lösung in verschiedenen Konzentrationen verwendet.

#### Leitfähigkeit von KCL-Lösung

| T [°C] | 0,001 mol/l | 0,01mol/l  | 0,1mol/l   | 1mol/l     |
|--------|-------------|------------|------------|------------|
| 18     | 0,127mS/cm  | 1,225mS/cm | 11,19mS/cm | 98,2mS/cm  |
| 19     | 0,139mS/cm  | 1,251ms/cm | 11,43mS/cm | 100,2mS/cm |
| 20     | 0,133mS/cm  | 1,278mS/cm | 11,64mS/cm | 102,1mS/cm |
| 21     | 0,136mS/cm  | 1,305mS/cm | 11,91mS/cm | 104,0mS/cm |
| 22     | 0,138mS/cm  | 1,332mS/cm | 12,15mS/cm | 105,9mS/cm |
| 23     | 0,141mS/cm  | 1,359mS/cm | 12,39mS/cm | 107,9mS/cm |
| 24     | 0,144mS/cm  | 1,386mS/cm | 12,64mS/cm | 109,8mS/cm |
| 25     | 0,147mS/cm  | 1,413mS/cm | 12,88mS/cm | 111,8mS/cm |

### 4.2 Leitfähigkeiten von Wässern und wässrigen Lösungen

|                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| Kesselspeisewasser     | bis 0,2µS/cm                 |
| Ionenaustauscher       | bis 1µS/cm (<70%Erschöpfung) |
| Regenwasser            | 10 ... 100µS/cm              |
| Trinkwasser            | 100 ... 2000µS/cm            |
| Meerwasser             | 10 ... 100mS/cm              |
| Ind. Prozesswässer     | bis 500mS/cm                 |
| konz. Säuren u. Laugen | bis 1000mS/cm                |